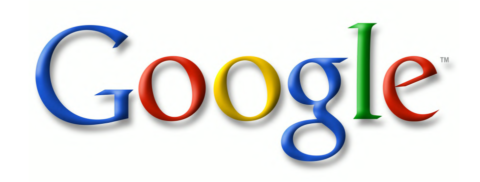



3 3433 06275100

ANNALES

DE

CHIMIE ET DE PHYSIQUE.

CINQUIÈME SÉRIE.

1879.

ANNALES

DE

CHIMIE ET DE PHYSIQUE,

PAR

MM. CHEVREUL, DUMAS, BOUSSINGAULT,
WURTZ, BERTHELOT, PASTEUR,

AVEC LA COLLABORATION DE

M. BERTIN.

CINQUIÈME SÉRIE. — TOME XVI.

PARIS,
G. MASSON, ÉDITEUR,
LIBRAIRE DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE,
Boulevard Saint-Germain
(en face de l'École de Médecine).

IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS,
Quai des Augustins, 55.

1879

ANNALES

DE

CHIMIE ET DE PHYSIQUE.

RECHERCHES SUR LA THÉORIE DE LA MACHINE DE GRAMME, SUR LA CAUSE DE LA POSITION DISSYMÉTRIQUE DE SES FROTTEURS, ET, INCIDEMMENT, ÉTUDE DES ÉCRANS MAGNÉTIQUES;

PAR M. ANTOINE BREGUET.

INTRODUCTION.

La machine de Gramme est réversible. La rotation de sa bobine donne naissance à un courant électrique, et, réciproquement, si un courant traverse la bobine, cette dernière se mettra à tourner autour de son axe. En raison de cette réversibilité si complète, toute théorie acceptable de la machine, prise comme électromoteur, doit pouvoir se retourner de toutes pièces pour expliquer la machine comme source de courant.

Les démonstrations qui ont généralement cours ne m'ont pas paru remplir ces conditions. Pour expliquer la machine de Gramme en tant que source de courant, on a coutume de supposer sa bobine développée sur un plan, et l'on vérifie alors que, sous cette nouvelle forme, les mêmes phénomènes persistent; mais l'analyse n'est pas poussée plus loin : on constate, on ne démontre pas.

Lorsqu'il s'agit de la machine prise comme électromoteur, voici l'explication la plus ordinaire de son fonctionnement. Par la disposition même des frotteurs, le courant parcourt le circuit de la bobine de manière à développer

dans l'anneau de fer un pôle austral (par exemple) à son entrée et un pôle boréal à sa sortie. Ces deux pôles se trouvent soumis à l'action de ceux de l'aimant extérieur et se déplacent pour obéir aux effets connus d'attraction et de répulsion. Rien de plus exact si les prises de courant étaient mobiles avec la bobine; mais les conditions mécaniques de l'appareil ne le permettent justement pas. Dès lors, il est facile de montrer que, si l'anneau tournait en vertu de cette théorie, le principe de la conservation de l'énergie serait infirmé. On pourrait, en effet, réaliser un système auquel s'appliqueraient les mêmes explications, sans dépense aucune d'énergie : il suffirait pour cela de déterminer la même distribution magnétique par l'influence des deux pôles d'un aimant fixe.

J'ajouterai, d'ailleurs, que la précédente manière de voir repose en grande partie sur la participation de l'anneau de fer au mouvement de rotation de la bobine, participation tout à fait indifférente, comme je le montrerai, au jeu de l'appareil.

La machine que présenta Faraday (1831), et que remit en lumière M. Le Roux dans ces dernières années, n'est que la roue de Barlow (1828), sans modifications sensibles. Les machines de Barlow ou de Faraday donnent bien naissance à un courant continu et de même signe sous l'influence d'une rotation continue et de même sens, mais ce courant n'est produit que dans un seul conducteur; sa tension ne dépend donc que de l'intensité du champ magnétique et de la vitesse de rotation, qui ne peuvent acquérir, dans la pratique, que des valeurs insuffisantes à l'obtention d'un courant utilisable. On conçoit que, si plusieurs machines de Faraday étaient associées par leurs pôles de noms contraires, le courant posséderait une tension proportionnelle au nombre de ces machines; mais ce serait là une solution peu élégante et qui exigerait autant de frotteurs qu'il y aurait de machines.

La première Partie de ce Mémoire aura pour objet d'établir comment la machine de Gramme réalise une première et ingénieuse solution de cet intéressant problème.

La seconde Partie traitera d'un point particulier, incomplétement expliqué jusqu'ici, de la même machine.

Faraday reconnut [1] la non-instantanéité des phénomènes d'induction. Verdet put en conclure [2] que c'est l'influence du temps qui oblige à déplacer, dans la machine de Page, les points où la direction du courant change de signe. Ces conclusions s'appliquent, sans modification, au commutateur de la machine de Clarke. Il a semblé naturel à la plupart des physiciens d'admettre que la position dissymétrique que l'on doit donner aux frotteurs des machines de Gramme dépendait encore de la même cause.

Je me propose de démontrer que la force coercitive des armatures de fer doux n'entre que pour la plus faible part dans le déplacement angulaire des frotteurs de Gramme, et même que ce déplacement est considérablement réduit par le seul fait de la présence de ces armatures.

Le principe fondamental qui servira de base au présent Travail est celui de la réaction d'un aimant et d'un conducteur parcouru par un courant. Je commencerai donc par rappeler les expériences les plus simples auxquelles il donne lieu. Sa réversibilité absolue m'autorisera à l'invoquer sous la forme qui me semblera la mieux adaptée aux questions particulières que j'aurai à résoudre, et, lorsque je m'en serai servi pour démontrer le mouvement d'un courant sous l'influence d'un aimant, il sera, par là même, également démontré que le même courant prendra naissance dans le conducteur si ce dernier est contraint mécaniquement à effectuer le même mouvement.

---

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. LI.

(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXI.

Il demeure toutefois bien entendu que « le déplacement relatif *d'un courant* causé par la présence d'un aimant » veut dire « déplacement *du conducteur* parcouru par le courant ». Une force mécanique agit, en effet, non sur une masse d'électricité, mais seulement sur la substance matérielle qui porte cette masse. La seule force qui puisse s'exercer sur une masse électrique est la force électromotrice (1).

I.

ROTATIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

1. Les lignes de force d'un champ magnétique, telles que les a définies Faraday, sont de l'usage le plus commode lorsqu'on veut concevoir sans difficulté quelles sont les actions réciproques des aimants et des courants. Il faut certainement se garder d'attribuer à ces lignes une existence réelle, de même que, lorsque l'on emploie l'expression de *courant électrique,* il ne faudrait pas donner à croire que l'on a une foi absolue dans l'existence d'un *courant,* au sens propre du mot. C'est un procédé de représentation, de simplification. On amène ainsi, par voie de comparaison, d'image, les phénomènes abstraits à revêtir une forme familière sur laquelle les raisonnements ont plus de prise.

Les propriétés que Faraday a reconnues aux lignes de force sont les suivantes :

1° Ces lignes tendent à se raccourcir ;

2° Des lignes de force de même sens, placées côte à côte, se repoussent.

L'aspect d'un champ magnétique quelconque, tel qu'on peut l'obtenir sur une feuille de carton à l'aide de limaille de fer, peut très-aisément se prévoir avec le secours de ces

(1) MAXWELL, *Electricity and magnetism,* t. II, p. 144.

deux définitions. La première conduit à se figurer une ligne de force comme un fil élastique dont les points fixes sont ceux où elle pénètre dans la masse de l'aimant. Cette ligne vient-elle, par une cause extérieure, à subir un allongement, ses points d'attache tendront à se déplacer jusqu'à ramener la ligne de force au minimum de longueur que comportent les conditions générales du système.

2. La *Pl. I, fig.* 1, montre l'exemple d'un champ de l'action magnétique sur un courant. A et B sont les deux pôles d'un aimant; *f* est un fil métallique perpendiculaire au plan de la figure et faisant partie d'un circuit fermé. Le courant qui traverse ce conducteur, d'arrière en avant, détermine un champ magnétique dont les lignes de force sont en projection des circonférences concentriques au fil. Les champs magnétiques de l'aimant et du courant réagissent l'un sur l'autre, et leurs lignes de force se distribuent de manière que, en définitive, leur tendance répulsive fasse équilibre à leur tendance à se raccourcir. La simple inspection de ce fantôme magnétique montre quel sera le mouvement relatif de l'aimant et du conducteur. Les lignes de force qui contournent ce dernier agissent de façon à le diriger vers le bas de la figure. Si le courant était, au contraire, dirigé d'avant en arrière, le conducteur serait sollicité à se déplacer en sens inverse.

Il importe de remarquer que ces déplacements obéissent aux règles d'Ampère : si le courant est personnifié par un observateur traversé par lui des pieds à la tête, la position d'équilibre vers laquelle tend le système est celle où l'observateur verra le pôle austral de l'aimant à sa gauche et le pôle boréal à sa droite.

Le principe de cette expérience n'est autre que celui de la roue de Barlow et du disque tournant de Faraday.

3. Réciproquement, si le conducteur *f* est déplacé mécaniquement de haut en bas de la figure, il deviendra le siége d'un courant dirigé d'avant en arrière, et, s'il est dé-

placé de bas en haut, le courant sera de signe contraire. On appelle ces courants *courants d'induction*. Leur tension est proportionnelle au nombre de lignes de force coupées par le conducteur en des temps égaux. Le nombre de ces lignes sert à définir l'intensité d'un champ magnétique en ses diverses régions. On peut dire ainsi que l'intensité en un point est proportionnelle à la densité des lignes de force en ce point. Il s'ensuit que la vitesse du déplacement du conducteur devra être d'autant plus grande pour engendrer un courant de force électromotrice constante que ce déplacement s'effectuera dans une région moins intense du champ magnétique.

Ces considérations vont me suffire pour exposer les divers trains mobiles dont le dernier terme constitue la machine magnéto-électrique de Gramme.

Premier système.

4. Cet appareil consiste (*Pl. I, fig.* 2) en un conducteur métallique deux fois recourbé à angle droit, porté par son milieu sur la pointe d'un axe vertical X, l'axe de rotation du système. Les branches verticales L et L′ plongent par leurs extrémités dans un canal circulaire contenant du mercure MM′. Les cloisons d'ébonite *c* et *c′* divisent ce canal en deux parties égales auxquelles aboutissent, par les bornes P et P′, les rhéophores d'une pile. Afin que l'appareil ne trébuche pas, pendant la rotation, lorsque les cloisons *c* et *c′* sont rencontrées par ses branches, celles-ci sont terminées par de petits appendices articulés qui se soulèvent facilement à leur passage sur chaque cloison, pour retomber aussitôt dans le mercure adjacent.

Plaçons cet appareil dans le champ magnétique d'un aimant AB, de telle sorte que le diamètre *cc′* soit perpendiculaire à la droite qui joint les pôles. Le conducteur se mettra à tourner autour de son axe aussi longtemps qu'il sera traversé par le courant de la pile.

Pour expliquer cette rotation, j'examinerai successivement :

1° L'influence des branches verticales L et L';

2° Celle du fil horizontal H qui relie ces deux branches l'une à l'autre.

5. *Action des branches* L *et* L'. — La *Pl. I, fig.* 3, représente schématiquement la projection horizontale de l'appareil. La flèche qui accompagne le fil H indique la direction du courant dans ce fil et par conséquent dans les branches verticales.

L'examen du fantôme magnétique montre immédiatement que le fil L tend à se déplacer vers le bas, et le fil L' vers le haut de la figure. Ces fils trouveront ainsi leurs positions respectives d'équilibre en c et en c'. Mais par son inertie même le train mobile dépassera cette position. Chaque branche franchira la cloison d'ébonite et se trouvera aussitôt en contact avec le canal de mercure opposé à celui qu'elle vient de quitter. Les conditions premières d'équilibre sont alors renversées; c'est L qui cherche à atteindre c', et L' qui se rapproche de c. A chaque demi-tour, la commutation du courant se produira au moment où le système mobile franchit sa position d'équilibre. Le mouvement est donc continu, et la rotation s'effectue dans le même sens.

Action du fil H. — La *Pl. I, fig.* 4, montre une projection verticale du même appareil. Une ligne de force AZB passe en avant de L', dans la première moitié de son parcours, et revient atteindre le pôle B en passant derrière L. La branche horizontale est donc soumise à deux actions de la part de cette ligne de force :

1° Cette ligne, rendue gauche par le courant H, tendra pour se raccourcir à devenir plane, et fera pivoter le conducteur horizontal autour de son milieu, jusqu'à l'amener à être perpendiculaire au plan AXB. On voit immédiatement que cet effet s'ajoute à celui des branches verticales qui vient d'être analysé.

2° La ligne de force, toujours pour se raccourcir, cherchera à augmenter son rayon de courbure, c'est-à-dire à se rapprocher de la ligne droite AB. Par suite, elle fera effort pour abaisser tout d'une pièce le conducteur H; mais les dispositions mécaniques de l'appareil n'autorisent pas un tel déplacement; la crapaudine sera seulement pressée avec plus de force contre son pivot.

Autrement dit : la première influence n'a que des composantes horizontales, et la seconde qu'une composante verticale de nul effet dans l'application qui nous occupe.

6. Comme, dans cette étude, je ne décrirai que des appareils pivotant sur un axe vertical, je ne tiendrai désormais aucun compte des composantes verticales qui pourront agir sur les circuits mobiles. Je suis donc en droit de supposer que toutes les lignes de force du champ magnétique sont situées dans des plans perpendiculaires à l'axe de rotation, ce qui supprime toute influence des fils horizontaux.

Ces suppositions ont seulement pour but de rendre plus clair l'exposé des divers cas plus complexes qui vont suivre.

Afin de simplifier le langage, j'appellerai :

Diamètre de commutation le diamètre cc' des cloisons;

Champ galvanique, le champ magnétique développé par les courants des circuits mobiles, pour éviter de le confondre avec le champ magnétique proprement dit, c'est-à-dire celui des aimants ou électro-aimants fixes.

7. Je puis modifier le train à deux branches de la manière suivante : les fils verticaux sont prolongés à leur partie inférieure par deux arcs de circonférence K et K', dont le plan est horizontal. Ces arcs (*Pl. I, fig.* 5), portent, chacun en son milieu, un appendice articulé identique à ceux de L et de L'. De cette façon, les canaux de mercure peuvent n'occuper qu'un arc de 90 degrés, au lieu de 180 degrés, sans que le courant cesse jamais de circuler dans le circuit, puisque, aussitôt qu'un appendice aban-

donnera le mercure, l'appendice suivant continuera ses fonctions.

Pour que le conducteur mobile subisse l'influence la plus grande possible, c'est-à-dire pour qu'un courant donné le fasse tourner avec la plus grande rapidité, il est indispensable de disposer les secteurs mercuriels en des régions déterminées du champ magnétique. Si l'on considère un plan perpendiculaire à la ligne des pôles de l'aimant et passant par l'axe de rotation, que j'appellerai (quoiqu'il ne soit pas le seul) *plan vertical de symétrie du champ magnétique*, le conducteur devra être parcouru par des courants d'un certain signe à droite du plan et de signes contraires du côté opposé. C'est là la condition de meilleur fonctionnement du système [1]. En effet, si d'un même côté de ce plan le conducteur est traversé, dans deux positions différentes, par des courants contraires, les deux effets se combattront; le moment du couple résultant sera donc diminué. De cette condition générale on peut aisément déduire la position la plus favorable des secteurs. La *fig.* 6 montre cette position dans le cas de la rotation indiquée par les flèches sous l'influence d'un courant allant de M en M′ et d'un aimant dont le pôle austral est à gauche.

8. Si, au lieu de deux appendices, les arcs K et K′ de la *Pl. I, fig.* 5, en portent quatre, les canaux de mercure pourront n'occuper que 45 degrés, et en général ces secteurs seront d'autant plus courts que le nombre des appendices sera plus grand. Leur emplacement le plus avantageux se détermine facilement. Chacun d'eux doit se trouver tout entier d'un même côté du plan vertical de symétrie, et chacun doit reposer contre ce même plan par une de ses

---

[1] Je montrerai plus loin que cette assertion n'est pas d'une exactitude absolue, si le champ galvanique ne possède pas une intensité infiniment faible par rapport à celle du champ magnétique.

extrémités. Si le nombre des appendices augmente de plus en plus, les secteurs finiront par n'occuper que l'espace rempli par les cloisons c et c' dans la première disposition (*Pl. I, fig.* 2). Les conducteurs mobiles seront d'ailleurs parcourus par un même courant et de la même manière dans les deux cas. Je suis donc amené à appeler encore *diamètre de commutation* le diamètre qui réunit deux arcs de mercure excessivement petits du système actuel.

Nous verrons que cette disposition est celle qui est commandée dans les appareils électromagnétiques les plus importants.

9. Il existe encore une autre variante du premier système, qui réalise un notable progrès, puisqu'elle permet d'obtenir, à l'aide du même courant, une rotation beaucoup plus rapide.

Imaginons (*Pl. I, fig.* 7) un fil enroulé autour d'un cadre rectangulaire semblable à celui d'un galvanomètre. Les deux extrémités du fil sont munies d'appendices semblables à ceux des appareils précédents. Le cadre peut, en outre, tourner librement autour de l'axe vertical oo. Il est facile de voir que tous les fils verticaux concourent à produire les mêmes effets ; chacun fournit un couple qui s'ajoute à ceux de tous les autres. Si la résistance électrique du circuit est négligeable par rapport à celle de la pile excitatrice, l'intensité du courant ne sera pas sensiblement modifiée. Le moment du couple résultant sera donc proportionnel au nombre des spires ; et, si cette grande longueur de fil n'accroît pas trop l'inertie du système mobile, celui-ci sera animé d'une vitesse considérable par rapport à celle de l'appareil à deux branches, toutes choses égales d'ailleurs.

Dans les divers trains mobiles qui vont suivre, on pourra toujours supposer chacun des fils comme formé d'un faisceau analogue à celui de la *Pl. I, fig.* 7, bien que, pour la clarté des figures et de l'exposition, il ne soit jamais ques-

tion que d'un conducteur unique. Voilà donc un premier moyen de multiplier les effets électromagnétiques qu'il ne faudra jamais négliger.

Deuxième système.

10. Au lieu d'un seul train à deux branches, suspendons sur le même pivot quatre de ces appareils, de telle façon que leurs fils verticaux se trouvent à égale distance les uns des autres.

1° Si le mercure s'étend de chaque côté sur un angle de 180 degrés, le nouveau système sera inférieur au précédent (*Pl. I*, *fig.* 2) comme rendement économique. En effet, chacun des secteurs partage également le courant qu'il apporte entre quatre conducteurs égaux; chacun de ces conducteurs est ainsi parcouru par un courant dont l'intensité est le quart de celle du courant d'un conducteur unique. Le champ galvanique n'est donc ni plus ni moins intense; il est seulement distribué d'une autre manière. Mais la masse de l'appareil mobile est aussi quatre fois plus grande, ses frottements sont augmentés. Cette disposition présente donc sur la précédente un désavantage qui n'est compensé par aucun nouvel avantage.

2° Si les secteurs mercuriels n'occupent qu'un angle de 45 degrés et si leurs milieux sont situés sur la ligne droite qui réunit les deux pôles, les conditions ne sont plus les mêmes. Un seul fil vertical à la fois sera parcouru par le courant de la pile. Le champ galvanique sera aussi intense que dans le premier système; mais il est continuellement amené à réagir sur la région la plus intense du champ magnétique. Son influence est donc mieux utilisée. Si l'inertie du nouvel appareil n'est pas trop augmentée, on conçoit que ce dispositif puisse constituer un perfectionnement.

Nous nous trouvons ainsi conduits à chercher le moyen

de modifier les appareils précédents de manière à les faire profiter de ce dernier avantage, à savoir, d'être continuellement amenés à réagir sur la région la plus intense du champ. Au lieu de subir une seule impulsion à chaque demi-tour, le système pourrait alors en subir un grand nombre pendant chaque révolution et acquérir par là une uniformité de mouvement très-désirable à tous les points de vue.

Les modes d'enroulement que nous allons maintenant passer en revue réalisent ces conditions et nous font toucher au dernier degré des progrès accomplis dans les rotations électromagnétiques.

Troisième système (circuit Von Alteneck).

11. Soit un circuit (*Pl. I, fig.* 8) formé par un seul fil dont les deux extrémités sont soudées l'une à l'autre, de façon à constituer un circuit sans fin. A chaque croisement, les fils sont soigneusement isolés l'un de l'autre. L'enroulement de ce conducteur peut se suivre à l'aide du numérotage des sommets, indiqué sur la figure. Les extrémités inférieures des branches verticales 1.2 — 13.14 — 9.10 — 5.6 sont terminées par de petits appendices destinés à plonger dans le mercure. L'appareil est d'ailleurs disposé de manière à pouvoir tourner librement autour de son axe de symétrie, lequel axe est vertical. Si le courant extérieur est amené par les appendices 1 et 9, les fils verticaux qui se trouvent en avant du plan 1.2.10.9 seront tous parcourus par des courants d'un même signe, et les fils verticaux situés en arrière du même plan seront tous parcourus par des courants de signe contraire. La résistance électrique d'un pareil circuit ne peut modifier d'une manière sensible l'intensité du courant, car la source voltaïque possède une résistance propre bien supérieure. Le courant qui circule dans un des fils verticaux, considéré

isolément, a donc, à très-peu près, la même intensité que celui qui traverserait une branche de l'appareil de la *Pl. I, fig.* 2.

Puisque le système actuel possède quatre branches, le champ galvanique mobile sera quatre fois plus intense (avec la même source électrique) que celui de l'appareil à deux branches. Il s'ensuit, si les auges de mercure occupent un arc de 90 degrés, que son action sur le champ magnétique sera plus grande, et qu'on aura ainsi réalisé un système tournant plus rapidement que le train à deux branches, sous l'influence d'un même courant, dans un même champ magnétique. En outre, puisque les secteurs mercuriels fournissent ici un courant pendant chaque quart de tour, les impulsions que reçoit le circuit mobile seront deux fois plus nombreuses que lorsque ces secteurs occupaient un arc de 180 degrés, comme dans le premier système.

L'enroulement de M. Alteneck réunit donc deux qualités indépendantes de la source du courant et du champ magnétique, à savoir : rotation plus égale et multiplication du champ galvanique.

Ce mode particulier ne se borne pas à donner le seul circuit que nous venons d'étudier. Au lieu de huit conducteurs verticaux, il est aisé d'en avoir un bien plus grand nombre. Le principe de cet enroulement réside dans l'existence d'un polygone étoilé d'un nombre pair de côtés. De tous ces polygones, l'octogone est le plus simple. C'est aussi lui qui nous a fourni le premier appareil réalisé par M. Alteneck.

12. J'ai dit (n° 7) que, pour obtenir les meilleurs effet sd'un train mobile, les courants positifs devaient tous se trouver d'un même côté du plan vertical de symétrie du champ. La position la plus favorable des secteurs mercuriels est par conséquent bien déterminée. La *Pl. I, fig.* 9, montre cette position dans le cas d'une rotation semblable

à celle des aiguilles d'une montre et du sens du courant indiqué par les flèches. L'appareil est supposé avoir seize fils verticaux; les auges de mercure ne s'étendent alors que sur un angle de 45 degrés. Le sens de l'enroulement n'est pas indifférent. La *Pl. I, fig.* 9, le suppose effectué d'après la *fig.* 8. Autrement, la rotation se produirait en sens inverse.

Pour se rendre compte de cet effet, il suffit de se rappeler l'appareil décrit au n° 7. Si, pour un spectateur placé debout le long de l'axe de rotation (*Pl. I, fig.* 5) et regardant la branche L, l'arc K s'étend à sa gauche, le système tournera de gauche à droite, dans les conditions de champ et de courant de la *fig.* 9. Si, au contraire, le même spectateur voit l'arc K à sa droite, la rotation s'effectuera de droite à gauche, dans les mêmes conditions.

Au lieu de seize conducteurs efficaces, nous pouvons en supposer un nombre beaucoup plus considérable. Le mercure des auges n'occupera alors que des arcs de plus en plus petits. A la limite, ces auges se réduiront à des arcs infiniment courts, situés en c et en c'.

13. Il est possible d'accroître la vitesse de rotation de tous les systèmes que je viens d'exposer. Leur mouvement dépend, en effet, non-seulement de l'intensité du courant ou du champ galvanique, mais encore de l'intensité du champ magnétique fixe. Or, il est possible d'augmenter cette dernière dans la région où se meuvent les conducteurs, par la seule introduction d'une armature de fer immobile entre leurs spires.

J'expliquerai plus loin le rôle de ces armatures; pour le moment, je me contenterai de dire que les meilleures conditions seront réalisées si le circuit mobile se meut entre les surfaces aussi rapprochées que possible de l'aimant et de l'armature.

Écrans magnétiques.

14. Avant de décrire le quatrième système, je dois donner quelques indications sur ce que l'on nomme les *écrans magnétiques*.

Les deux propriétés fondamentales que Faraday a reconnues aux lignes de force (n° 1) ne permettent pas de se rendre, dans tous les cas possibles, un compte exact et rapide de la distribution de l'intensité d'un champ magnétique.

Il convient, pour cela, d'ajouter :

« Que deux lignes de force d'égale longueur, mais situées dans des milieux différents, ne doivent pas *magnétiquement* être regardées comme également longues. Celle qui se trouve comprise dans une substance magnétique est *magnétiquement* plus courte que celle qui se trouve comprise dans une substance diamagnétique, ou plus généralement dans une substance moins magnétique que la première [1]. »

Cette sorte de scolie permet d'expliquer simplement l'orientation en long ou en large d'aiguilles magnétiques ou diamagnétiques sous l'influence d'un aimant. Un corps magnétique est, à certains égards, assimilable en magnétisme à un corps conducteur en électricité. Dans un réseau de fils métalliques de conductibilités différentes, le courant électrique se partage de manière que la plus grande masse d'électricité passe dans les fils de plus grande conductibilité. Dans un champ magnétique, les lignes de force traverseront en abondance les substances les plus magné-

[1] Cette remarque repose sur l'hypothèse ingénieuse de M. Ed. Becquerel, à savoir qu'une substance n'est jamais magnétique ou diamagnétique d'une façon absolue, mais qu'elle peut être l'une ou l'autre, suivant le milieu qui l'environne.

tiques et sembleront éviter les milieux diamagnétiques, pour être toujours, en fin de compte, les plus courtes possibles.

Si un corps magnétique est libre de se mouvoir autour d'un de ses points, on conçoit que les lignes de force tendent à l'orienter de manière à placer sa plus grande dimension dans leur direction générale. Elles traverseront ainsi ce corps suivant une plus grande longueur. Au contraire, une substance diamagnétique, c'est-à-dire moins magnétique que le milieu ambiant, serait déplacée de façon à offrir sa plus petite épaisseur à la direction moyenne des lignes de force.

La substance magnétique peut être non-seulement mobile autour d'un de ses points, mais encore être libre de prendre un mouvement quelconque. Alors elle sera sollicitée à se placer dans la région la plus intense du champ, afin que le plus grand nombre possible de lignes de force jouissent du privilége de la traverser. C'est pourquoi un morceau de fer viendra, en général, s'appliquer contre l'un des pôles d'un aimant. Au contraire, une substance suffisamment diamagnétique s'écarterait des parties intenses du champ.

En résumé, si l'on tient compte de la remarque ci-dessus, on peut dire que, dans tous les cas, la distribution stable de ces lignes sera établie lorsque leur tendance au raccourcissement fera équilibre à leurs répulsions réciproques.

15. Ces considérations vont me permettre de constater qu'il est possible de modifier un champ magnétique de manière à rendre son intensité aussi faible qu'on le veut dans une région désignée d'avance. Il suffira, pour atteindre ce but, de rendre très-rares les lignes qui traversent cette région.

Si A et B sont les deux pôles d'un aimant et si F représente la projection horizontale d'un cylindre de fer

entr'ouvert, le fantôme magnétique offrira l'aspect de la *Pl. I, fig.* 10.

Le fer est à peu près un million de fois plus magnétique que l'air. Les lignes de force auront donc une tendance considérable à effectuer une partie de leur parcours dans la masse du fer, sous la plus grande longueur possible, et cette tendance réduira notablement l'influence des répulsions parallèles de ces lignes. La figure s'explique ainsi d'elle-même, et l'on voit combien sont rares les lignes de force situées à l'intérieur de ce cylindre.

Si le cylindre est complétement fermé comme dans la *Pl. I, fig.* 11, ces lignes sont encore en plus petit nombre dans son intérieur. Et si l'épaisseur du fer est assez grande, en raison de son immense pouvoir magnétique, on peut même dire qu'elles n'y existent physiquement pas, surtout lorsque la longueur du cylindre est considérable.

Mais si, au contraire, le cylindre est court et affecte la forme d'un anneau, un certain nombre de lignes de force viendront pénétrer dans son intérieur en contournant ses bords. La *fig.* 12 montre la coupe d'un anneau FF situé entre les pôles A et B d'un aimant. L'examen de cette figure me dispense de tout commentaire.

Les *fig.* 11 et 12 de la *Pl. I* font comprendre que l'intérieur d'une sphère de fer suffisamment épaisse ne doit contenir qu'un nombre excessivement petit de lignes de force.

Cette propriété a été mise à profit par sir W. Thomson. Un galvanomètre ne fournit de mesures comparables qu'autant que la force directrice qui agit sur son aiguille est constante. Les galvanomètres employés à bord des navires porteurs des câbles transatlantiques ne pouvaient donner d'indications utiles, puisqu'ils changeaient sans cesse de méridien magnétique. Sir W. Thomson surmonta cet obstacle. Il enferma l'appareil dans une enveloppe de fer

forgé, qui présentait seulement quelques ouvertures poui permettre d'observer les déviations de l'aiguille. La force directrice était fournie par un aimant spécial, situé à l'intérieur de l'enveloppe et solidaire de celle-ci.

16. Si, au lieu d'être en fer, le cylindre des *fig.* 10, 11 et 12 de la *Pl. I* était constitué par une substance diamagnétique, le champ offrirait une image toute différente; mais on n'a encore trouvé à aucun corps un pouvoir diamagnétique comparable au pouvoir magnétique du fer. L'effet perturbateur de la substance la plus diamagnétique que l'on connaisse, le bismuth, est absolument inappréciable dans un fantôme produit avec de la limaille de fer. Les *fig.* 13 et 14 de la *Pl. I* montrent pourtant ce que deviendraient les *fig.* 11 et 12 s'il existait un corps suffisamment diamagnétique.

17. On possède ainsi le moyen de réaliser de véritables écrans magnétiques. Par contre, ainsi que nous allons le constater, il est également facile d'augmenter l'intensité du champ dans une région donnée. Lorsque l'anneau de fer est retiré du champ magnétique des *fig.* 11 et 12 de la *Pl. I,* les lignes de force ne subissent plus leur tendance à traverser l'armature et cèdent à l'influence de leurs répulsions mutuelles. Elles s'écartent l'une de l'autre et prennent une distribution d'équilibre différente de la première. La présence de l'armature de fer doux avait donc accru l'intensité du champ entre sa propre surface et celle des aimants, et plus ces surfaces seront rapprochées, plus sera grand le nombre de lignes de force dont elles modifient la courbure pour les concentrer dans l'espace qui les sépare.

La forme annulaire de l'armature n'a ici aucune importance. C'est sa surface extérieure seule qui se trouve en jeu. Ainsi, pour exalter l'intensité du champ magnétique d'une manière avantageuse dans les appareils de rotation décrits précédemment, il faudra placer leurs conducteurs entre les pôles excitateurs et une masse de fer doux. Le

meilleur effet sera obtenu lorsque l'espace qui sépare l'armature et les aimants sera réduit à son minimum. On devra donc ne laisser que juste l'intervalle nécessaire au passage du circuit mobile. Le nombre des lignes de force qui influencent le circuit sera ainsi beaucoup plus considérable que si l'armature était absente. Comme je l'ai dit au n° 13, ce procédé de multiplication des actions électromagnétiques est applicable à tous les systèmes que j'ai passés en revue.

18. *Écrans magnétiques en mouvement.* — J'avais été amené, par diverses considérations, à penser qu'une masse de fer qui se meut uniformément dans un champ magnétique constant n'entraîne pas les lignes de force de ce dernier. Elle leur fait seulement subir une déformation permanente, dont la valeur dépend de la vitesse du mouvement, d'une part, et, d'autre part, de la raideur de ces lignes, c'est-à-dire de l'intensité du champ.

Une expérience élégante de M. G. Lippmann ([1]) est venue confirmer cette manière de voir, de la façon la plus nette, en permettant d'établir qu'une armature de fer cesse de remplir ses fonctions d'écran dès qu'elle est animée d'un mouvement de translation. Ce fait intéressant peut d'ailleurs se concevoir aisément.

Soit un anneau de fer (*Pl. I, fig.* 15) situé dans un champ magnétique que, pour plus de simplicité, je supposerai d'abord constant dans toute son étendue. On a vu plus haut qu'un certain nombre de lignes de force suffisamment voisines de l'anneau seront infléchies et le contourneront suivant un arc de sa circonférence. La constance du champ entraîne une symétrie complète par rapport au plan méridien de l'anneau, parallèle aux lignes de force, et cela dans toute position de l'anneau. Or, déplaçons celui-ci de façon que son arc supérieur contienne N nouvelles

([1]) Société de Physique, 3 janvier 1879.

lignes, il est évident que son arc inférieur en abandonnera une égale quantité. Mais chacun de ces arcs doit toujours, à l'état statique, recéler le même nombre de lignes de force. Il a donc fallu que, au moment où une nouvelle ligne s'introduisait dans l'arc supérieur, une ligne abandonnât ce même arc pour aller remplacer dans l'arc inférieur celle que ce dernier venait de perdre. Alors seulement la symétrie subsiste, et l'on doit en conclure qu'une ligne de force a dû traverser la région interne de l'anneau.

Ainsi, lorsque le champ se déplace par rapport à la bague de fer, toutes les parties de ce champ qui sont comprises dans l'intérieur de cette bague sont traversées par autant de lignes de force que si l'anneau était supprimé; mais, si la quantité des lignes est la même dans les deux cas, la qualité de leur passage est différente. A l'intérieur de la bague, ces lignes sont animées d'une grande vitesse et elles n'apparaissent qu'à des intervalles de temps relativement longs.

C'est ainsi qu'une masse liquide qui s'écoule dans des conduites prend aux sections étroites une vitesse plus considérable que dans les larges sections, de manière que, en définitive, le débit soit le même en chaque point.

Si le champ magnétique n'était pas constant, les vitesses de passage des lignes de force seraient inégales pendant un déplacement uniforme de l'anneau. C'est la seule modification qu'il y aurait à introduire dans les précédentes explications.

19. Il nous est possible maintenant de déterminer dans quel cas une masse de fer mobile ou fixe remplira ou non l'office d'écran. Si l'anneau de fer considéré ci-dessus tourne autour de son axe de symétrie, il continuera, malgré son mouvement de rotation, à abriter sa région interne de toute influence magnétique, puisqu'il occupera constamment les mêmes points de l'espace.

Mais, si le déplacement dont il est animé est une transla-

tion ou, plus généralement, une rotation autour d'un axe différent de son axe de symétrie, les conditions ne sont plus les mêmes : aucune partie du champ n'échappera à l'action des lignes de force.

Quatrième appareil (*circuit Gramme*).

20. Cherchons à répéter les expériences de rotation électromagnétique à l'aide du conducteur représenté dans la *Pl. I*, *fig.* 16, en élévation et en plan. Si un courant de pile parcourt ce conducteur, en passant successivement par les fils 1, 2, 3 et 4, les fils 1 et 2 seront le siége de courants contraires ; par conséquent, leurs réactions sur le champ magnétique fixe seront également de signe contraire. Si le fil 1 est sollicité à se déplacer de gauche à droite, le fil 2 tendra à se mouvoir de droite à gauche.

Comme les conducteurs 3 et 4 jouent dans la seconde moitié du champ le même rôle que les premiers, il s'ensuit que deux couples de sens contraire agissent sur le système mobile. En appelant D la distance qui sépare les fils extérieurs 1 et 4, et D′ celle qui sépare les fils 2 et 3, le premier couple a pour moment $+ FD$, et le second $- F'D'$. La force F dépend de l'intensité du courant et de celle du champ magnétique. La première est la même pour tout le circuit, et je supposerai la seconde constante dans toute l'étendue occupée par l'appareil pendant sa rotation. Il s'ensuit que $F = F'$. On voit ainsi immédiatement que, si $D = D'$, le système restera immobile, quelles que soient les intensités des champs magnétique et galvanique. Si $D > D'$ (c'est le cas de la figure), la rotation s'effectuera dans le sens de la force F, et sous une influence d'autant plus grande que la différence entre D et D′ sera plus accusée. Si enfin $D' = 0$, le couple FD agira intégralement, et nous sommes ramenés au cas du premier train mobile de la *fig.* 2 de la *Pl. I*.

Ce qui empêche le système actuel de subir toute l'action du couple + FD lorsque D′ n'est pas nul, c'est l'influence du champ magnétique sur les fils internes 2 et 3. S'il était possible de soustraire ces derniers conducteurs à cette influence, le couple — F′D′ serait annulé, puisque F′ serait nul. Or, une bague de fer occupant l'espace annulaire compris entre les deux circonférences de rayon o1 et o2 permet d'atteindre ce but. Cette armature réalise, en effet, un écran magnétique à l'égard des fils 2 et 3.

21. Bien que nous ayons défini ces écrans, analysons en détail le cas qui se présente ici.

La *Pl. I, fig.* 17, nous montre le fantôme magnétique pris suivant une coupe diamétrale de l'anneau. On y reconnaît trois groupes de lignes de force dont les formes sont notablement différentes.

1° *Le groupe m.* — Ces lignes, qui sont de beaucoup les plus nombreuses, partent des pôles pour aboutir directement, presque en ligne droite, dans les parties de l'anneau situées en regard de ces pôles.

2° *Le groupe n.* — Celles-ci, en bien moins grand nombre que les précédentes, semblent d'abord éviter l'anneau; elles en contournent la tranche et reviennent, en se recourbant sur elles-mêmes, pénétrer dans sa surface interne.

3° *Le groupe p.* — Ces lignes ne rencontrent l'anneau en aucun point de leur parcours et sont toutes situées au-dessus ou au-dessous de lui.

Il est à remarquer qu'aucune ligne ne traverse l'anneau de part en part pour passer directement d'un pôle à l'autre.

Si la longueur de l'anneau est très-grande, le groupe *m* seul représente un champ magnétique de quelque importance. Les groupes *n* et *p* deviennent alors tout à fait négligeables. Mais, dans l'espèce, nous considérons une bague d'une hauteur inférieure à son diamètre. Nous de-

vons donc tenir compte des deux derniers groupes. Nous allons voir que le second (n) conspire à produire les mêmes effets que le premier (m), quoique avec moins d'intensité. Quant au troisième (p), il n'intervient en rien dans les phénomènes de rotation, puisque ces lignes ne sont coupées en aucun point par les conducteurs mobiles.

22. Disposons le circuit de la *Pl. I, fig.* 16, de telle sorte que les fils 1 et 4 soient extérieurs à l'anneau et que les fils 2 et 3 lui soient intérieurs (*Pl. I, fig.* 18), et recherchons, dans ces conditions nouvelles, quels seront l'action et le sens des couples qui s'exercent séparément sur les systèmes 1.4 et 2.3. Le rôle de la bague de fer, à l'égard du système 1.4, n'est autre que celui d'une armature ordinaire qui augmente l'intensité du champ, ainsi qu'il est dit au n° 17.

Le moment du couple $+FD$ est donc devenu $+F_1D$, F_1 étant plus grand que F.

Quant au couple $-F'D'$, il est complétement modifié. Ce sont les lignes du groupe n qui sont coupées par le fil 2. Or ces lignes semblent, pour ce conducteur, provenir d'un pôle boréal B' situé à sa gauche ; et, si l'on tient compte de ce que, ici, le courant est descendant, on verra sans peine que le fil 2 tend à se déplacer d'arrière en avant de la figure. On trouverait que le fil 1 est sollicité à se mouvoir de la même manière, car le courant qui le parcourt est ascendant et le pôle austral est à sa gauche.

Ainsi, la présence de l'anneau de fer a changé le signe du couple interne et en a diminué la valeur absolue ; d'autre part, elle a augmenté la valeur du couple externe en lui conservant son signe ; et cela, quelque petite que soit la distance radiale des fils 1 et 2.

Le système sera soumis à l'action des deux couples de même signe $+F_1D$ et $+fD'$. Il se mettra donc à tourner de gauche à droite. C'est ce que l'expérience confirme avec la plus grande netteté.

23. On a vu (nº 19) que, si l'anneau de fer est entraîné dans une rotation autour de son axe de figure, il remplit exactement les mêmes fonctions magnétiques que s'il est immobile. Nous pouvons donc supposer, dans l'appareil qui précède, la bague de fer doux solidaire du circuit, et rien ne sera changé dans les effets que nous venons d'analyser.

Sous cette dernière forme, il est possible de réaliser une multiplication de l'appareil de la *fig.* 18 de la *Pl. I*, qui présente les mêmes avantages que l'enroulement imaginé par M. Alteneck. Nous arrivons ainsi à une sorte de schéma de la machine de Gramme.

La *fig.* 19 de la *Pl. I* montre un anneau de fer doux sur lequel a été enroulé, en quatre spires équidistantes *a*, *b*, *c*, *d*, un fil métallique isolé dont les extrémités sont réunies l'une à l'autre de manière à constituer un circuit sans fin. Les parties inférieures de chacune des spires sont munies d'appendices articulés destinés à plonger, comme plus haut, dans des rhéophores de mercure. Tout le système est libre de tourner autour de son axe de symétrie.

La *fig.* 20 de la *Pl. I* représente une projection horizontale de l'appareil. Les fils verticaux extérieurs et intérieurs à l'anneau exerçant des actions identiques quant à leur signe, les fils extérieurs ont été seuls indiqués (par des points); la rotation s'expliquera absolument comme au nº 12. Elle s'effectuera de gauche à droite, dans les conditions de la *fig.* 20 de la *Pl. I*, et, pour le sens d'enroulement, de la *fig.* 19.

Au lieu de quatre spires, on pourrait en supposer six, huit, etc.; l'étendue des secteurs mercuriels devrait seulement être réduite en proportion de leur nombre.

MACHINES MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES QUI SE DÉDUISENT DES APPAREILS PRÉCÉDENTS.

Roue de Barlow.

24. J'ai rappelé (nº 2) que l'expérience de la *fig.* 1 de la *Pl. I* donne le principe de la roue de Barlow.

Disque tournant de Faraday, disque de Foucault, machine de M. Le Roux.

Toutes ces applications ne sont que des formes très-peu différentes de la roue de Barlow, en tenant compte de la réversibilité à laquelle cette dernière donne lieu.

Machine à double T *de Siemens, machine de Wilde.*

L'appareil décrit au nº 9 (*Pl. I, fig.* 7) représente cette machine avec la plus grande exactitude, quoique considérée dans sa fonction inverse, celle d'électromoteur. Pour en faire une véritable machine de Siemens ou de Wilde, il suffit de donner au circuit une hauteur très-grande par rapport à son diamètre et d'introduire une armature de fer doux dans le cadre de la bobine. Cette armature est solidaire du circuit. Cette solidarité est d'ailleurs commandée, non par la théorie, mais par la pratique.

Machine de Gramme, machine d'Alteneck.

J'ai indiqué, dans le cours de cette étude, quels sont les appareils qui, parachevés, donnent naissance à ces deux dernières machines. Chacun des fils des *fig.* 8 et 19 de la *Pl. I* est remplacé par un véritable écheveau semblable à celui du nº 9 (*Pl. I, fig.* 7). Les contacts fixes, au lieu d'être des auges de mercure, sont des frotteurs

métalliques pressés sans cesse sur la jante d'une sorte de rhéotome. Les parties métalliques de ce rhéotome correspondent respectivement aux écheveaux dont il vient d'être question, de la même manière que les appendices articulés des appareils de rotation communiquent avec les spires de leur circuit.

25. On peut admettre que les fils extérieurs à l'anneau de fer, dans la bobine Gramme, et les fils parallèles à l'axe de rotation, dans la bobine Alteneck, soient seuls à considérer pour la production du courant. En effet, les fils internes dans la première et les fils radiaux dans la seconde ne sont coupés que par un nombre relativement peu considérable de lignes de force. Or, dans ces conditions, si les dimensions de la bobine, le nombre et le diamètre des fils, leur nature, le champ magnétique et la vitesse de rotation sont les mêmes, la même force électromotrice sera développée dans les deux circuits. Celui d'entre eux qui sera le moins long sera donc le siége du courant le plus intense d'après la formule connue d'Ohm :

$$I = \frac{E}{R}.$$

En appelant d le diamètre et e l'épaisseur d'une bobine Gramme ou Alteneck, la longueur du fil nécessaire à la confection d'une spire complète est dans la bobine Gramme

$$4e \text{ (}^{1}\text{)},$$

et, dans la bobine Alteneck,

$$2(e + d),$$

si l'on ne tient pas compte de la longueur additionnelle

(1) La spire complète, dans l'anneau Gramme, doit se composer de deux spires diamétralement opposées pour se comparer à une spire de l'anneau Alteneck.

des fils qui résulte de leur superposition sur les deux bases circulaires de l'anneau.

En conséquence de ce qui précède, si

$$4e < 2(e+d),$$

la machine de Gramme sera la plus avantageuse, et si

$$4e > 2(e+d),$$

elle sera inférieure à celle d'Alteneck; si enfin

$$4e = 2(e+d),$$

les deux machines fourniront des courants identiques.

Cette dernière équation étant équivalente à

$$e = d,$$

on voit que, suivant que l'épaisseur de la bobine sera plus petite ou plus grande que son diamètre, la machine de Gramme sera supérieure ou inférieure à celle d'Alteneck.

Dans la pratique, à cause de la grande vitesse de rotation que l'on donne aux bobines (800 à 900 tours par minute), les bobines les plus aplaties présentent le plus de garantie de durée. Pour obtenir le maximum d'effet d'une machine donnée, il faut que la surface extérieure du circuit se meuve aussi près que possible des surfaces polaires fixes, et l'on peut arriver à réduire cet intervalle à 1 ou 2 millimètres à peine. Pour peu que la force centrifuge écarte les fils de la bobine, ceux-ci viennent frôler le fer des électro-aimants, et sont aussitôt dénudés et souvent coupés, ce qui nécessite une réparation de la machine. Il est clair que plus la longueur de ces fils sera grande, plus grands aussi seront les risques d'avarie. Aussi doit-on envelopper de place en place les bobines longues, à l'aide de bandes de toile fortement serrées, qui soient capables de s'opposer à la force qui tend à soulever les fils. Mais ces bandes ont une certaine épaisseur propre qui oblige à reculer d'autant

les surfaces polaires : ce qui diminue considérablement l'intensité du champ magnétique. Les bobines les plus plates doivent donc être préférées aux bobines larges; l'axe de rotation se trouve pour les premières être leur axe principal d'inertie, ce qui ajoute encore à l'avantage qu'elles présentent. Ces considérations portent à regarder la machine Gramme comme supérieure à la machine Alteneck.

Néanmoins, cette dernière, sous sa forme la plus perfectionnée, a pu lutter avec une machine Gramme du type le plus primitif il est vrai, comme l'a fait connaître un Rapport de M. Tyndall.

Dans des expériences comparatives, entreprises en mai 1878, par le Comité de l'Institut Franklin, à Philadelphie, sur une machine de Gramme et sur diverses machines magnéto-électriques (*Brush machine* et *Wallace-Farmer machine*) ([1]), il a été, d'ailleurs, établi que la machine de Gramme était la source de courant la plus économique. Il est regrettable que M. Alteneck n'ait pu soumettre une de ses machines à ces épreuves.

II.

POSITIONS DISSYMÉTRIQUES DES PRISES DE CONTACT DANS LES MACHINES DE LA DERNIÈRE FAMILLE.

26. Il me reste encore à analyser un phénomène général qui se rencontre dans tous les appareils dont il vient d'être question. L'expérience montre que, pour obtenir d'une machine Gramme les meilleurs effets possibles, il convient de donner aux balais frotteurs une position notablement différente de celle que la théorie semble à première vue leur assigner. Cette anomalie a toujours été attribuée au

---

([1]) La machine *Wallace-Farmer* ne diffère en rien de celle de M. Niaudet. La *Brush machine* est une sorte de machine de Wilde multiple.

retard à la désaimantation de l'anneau de fer doux. Je me propose de démontrer que ce n'est pas là sa vraie cause, et que la force coercitive ne peut suffire à expliquer toutes les particularités de ce phénomène.

Revenons au premier système de la *fig.* 2 de la *Pl. I*, le plus simple de tous. Considérons (*Pl. I, fig.* 21), pour fixer les idées, le champ magnétique réduit à la seule ligne de force principale AB. La direction de la force que cette ligne exerce sur le conducteur f est donnée par celle de la perpendiculaire abaissée de f sur AB. Quant à la grandeur de cette même force, elle est maximum lorsque f se trouve sur AB, puis décroît en raison inverse du carré de la distance qui les sépare.

Il est facile d'en conclure que :

L'instant où doit s'établir la commutation pour produire les meilleurs effets est celui où la perpendiculaire commune au conducteur et à la ligne de force passe par l'axe de rotation.

En effet, si le courant change de signe t secondes avant ou après cet instant, le couple auquel sera soumis le système, pendant ces t secondes, tendra à lui imprimer une rotation contraire à celle qui l'anime tout le reste du temps.

27. J'ai toujours supposé jusqu'ici que la ligne de force AB était rectiligne pendant le jeu des appareils. Si cela était, le diamètre de commutation devrait toujours être la droite cc' perpendiculaire au milieu de AB, et contenue dans le plan que j'ai appelé le *plan vertical de symétrie du champ*.

Mais, en réalité, c'est seulement dans deux cas bien particuliers que la ligne de force principale est droite. Dans tous les autres, elle est recourbée en forme de S et présente un point d'inflexion en son milieu.

Supposons que les conducteurs, maintenus immobiles dans la position de la *fig.* 22 de la *Pl. I*, soient parcourus par un courant. Ce courant donne naissance, on le sait, à un champ

galvanique. Celui-ci réagit sur le champ magnétique fixe, et le déforme, ainsi qu'en témoignent les fantômes que l'on peut obtenir à l'aide de la limaille de fer. Dans les deux conducteurs f et f', les courants sont de signes contraires; la ligne de force AB sera, par conséquent, infléchie au-dessus de f et au-dessous de f'. La tangente à cette ligne menée en son milieu sera donc inclinée d'un angle α sur la droite qui joint les pôles A et B; et, d'après la règle établie plus haut, la position la plus favorable du diamètre de commutation n'est plus l'ancien diamètre cc', mais bien un nouveau $c_1c'_1$ incliné sur celui-ci du même angle α.

28. Cela ne serait pourtant pas encore absolument vrai. Les conducteurs ont été supposés immobiles; laissons-les à présent libres de se mouvoir. Pendant leur rotation, ils couperont nécessairement à chaque demi-tour la ligne de force AB et seront, par conséquent, le siége d'une nouvelle force électromotrice tout à fait distincte de celle qui les animait au repos. Il serait absurde d'admettre que ce nouveau courant est de même sens que le courant excitateur, car cela reviendrait à admettre la possibilité du mouvement perpétuel. En effet, c'est un courant d'induction qui se produit ici, c'est-à-dire un courant dont la tendance est de s'opposer au mouvement qui lui donne naissance. Le champ galvanique d'induction est donc inverse du champ galvanique ordinaire, et, dès lors, son effet sur le champ fixe consistera à réduire la déformation de la ligne AB et à ramener ainsi le diamètre $c_1c'_1$ plus près de cc'.

29. Si la résistance de l'air, les frottements sur les pivots et ceux des prises de contact pouvaient être rendus absolument nuls, le système arriverait à un régime permanent de vitesse, qui donnerait lieu à un courant d'induction exactement opposé au courant excitateur. Ce serait le cas théorique du rendement parfait, mais ce serait aussi le cas, où aucun travail ne s'accomplirait. La rotation ne s'effectuerait qu'en vertu du principe de l'iner-

tie, et le diamètre de commutation devrait occuper la position cc'.

Si, au contraire, le système tournant est employé à vaincre une résistance, en d'autres termes, s'il produit du travail, sa vitesse de régime sera relativement très-inférieure à la précédente; aussi le champ galvanique d'induction sera-t-il, dans ce cas, hors d'état de s'opposer à la déformation de la ligne AB : il la réduira seulement dans une certaine mesure.

En résumé, si nous considérons une machine Gramme servant d'électromoteur, et si nous l'excitons par une source électrique constante, l'angle que fait le diamètre des frotteurs avec la perpendiculaire à la ligne des pôles doit être d'autant plus grand que la machine accomplit un travail plus considérable. La *fig*. 22 de la *Pl. I* montre que le déplacement des frotteurs doit alors s'effectuer *en sens inverse de la rotation du système.*

30. Faisons maintenant la même étude à l'égard de la machine Gramme prise dans sa fonction la plus commune, c'est-à-dire servant à produire de l'électricité. Ici, tous les courants sont d'induction; ils tendent, par conséquent, à s'opposer à la rotation. Si l'on suppose que cette dernière ait encore lieu de gauche à droite, le champ galvanique déformera le champ magnétique, comme le montre la *fig*. 23 de la *Pl. I*, c'est-à-dire à l'inverse de tout à l'heure.

Nous allons voir que, dans ce nouveau cas, le déplacement des frotteurs est encore d'autant plus grand que le travail accompli est plus considérable.

Soient I et R l'intensité du courant et la résistance du circuit, et K une constante. Le travail du courant a pour expression

$$KRI^2,$$

qui peut s'écrire, en vertu des lois d'Ohm,

$$\frac{KE^2}{R}.$$

Si R est infini, ce qui correspond au cas d'un circuit ouvert, et si nous ne considérons que l'état permanent et non la période variable de charge de tous les conducteurs, l'expression du travail est nulle. Or, l'intensité du champ galvanique est nulle aussi, sans quoi un électro-aimant attirerait son armature dans un circuit non fermé. Le champ magnétique ne subit donc aucune déformation, et cc' est la position du diamètre de commutation.

Si, au contraire, R est très-petit, ce qui correspond au cas d'un court circuit, le travail est considérable. Par les mêmes raisons, l'intensité du champ galvanique, qui est proportionnelle à celle du courant, est aussi très-grande, et, partant, l'angle du diamètre $c_1c'_1$ avec cc' acquiert une valeur importante.

Il est à remarquer que le déplacement des frotteurs doit s'effectuer ici *dans le sens de la rotation*.

31. La déformation de la ligne de force AB dépend, nous l'avons vu, de l'intensité du champ galvanique; mais l'influence de ce dernier ne peut aller jusqu'à causer un déplacement des balais de plus de 90 degrés. La répulsion s'exerce, en effet, suivant la direction perpendiculaire menée de f à la droite qui réunit les pôles de l'aimant fixe (*Pl. I, fig.* 23), et, si l'on suppose de plus en plus grande l'intensité du champ galvanique, les points de la ligne de force où la tangente est parallèle à cette droite des pôles ne cessent jamais de se trouver du même côté de cc'. Par conséquent, à la limite, la droite qui joint ces deux points coïncidera avec cc'. La normale, au milieu de cc', est donc la position la plus reculée que puisse prendre le diamètre de commutation $c_1c'_1$; il fait alors un angle de 90 degrés avec sa position d'origine.

J'ajouterai qu'il va sans dire qu'une même déformation de la ligne AB peut provenir aussi bien d'une intensité n du champ galvanique que d'une intensité $\frac{1}{n}$ du champ magnétique.

Cela posé, soient :

C_m l'intensité du champ magnétique;

C_g l'intensité du champ galvanique;

R la résistance du circuit;

Δ le déplacement angulaire à donner au diamètre de commutation, par rapport à la direction d'origine cc'.

Nous savons que, pour

$$\begin{cases} C_m = 0, & \text{on a} \quad \Delta = 90^\circ, \\ C_m = \infty, & \Delta = 0, \end{cases}$$
$$\begin{cases} C_g = 0, & \Delta = 0, \\ C_g = \infty, & \Delta = 90^\circ, \end{cases}$$
$$\begin{cases} R = 0, & \Delta = 90^\circ, \\ R = \infty, & \Delta = 0. \end{cases}$$

Ces limites peuvent servir à trouver une expression générale de Δ qui en donne avec assez d'approximation la valeur correspondant à des valeurs particulières des champs magnétique et galvanique et de la résistance du circuit total.

Cette expression est la suivante :

$$\tan g\,\Delta = \frac{C_g}{\tan g\,(RC_m)}.$$

Lorsque, le sens de la rotation étant le même, la machine est employée comme électromoteur, puis comme source de courant, le champ galvanique C_g change de signe. Cette formule indique bien, comme cela doit être, que le déplacement des frotteurs doit être effectué en sens inverse, car Δ devient négatif.

32. La présente étude a trop montré combien tous les systèmes que j'ai successivement exposés se résolvent les uns dans les autres, pour qu'il soit nécessaire de démontrer que les résultats que je viens d'établir spécialement

au sujet de l'appareil à deux branchès s'appliquent intégralement à tous les autres.

Mais on pourrait croire que la présence d'une armature de fer agisse notablement dans un sens déterminé pour augmenter, dans une des fonctions d'un appareil, le déplacement des prises de contact et le diminuer dans la fonction inverse. On serait évidemment en droit de s'y attendre. Il suffit, cependant, de faire quelques expériences quantitatives pour se convaincre que l'influence du fer doux dans les machines construites avec soin (du modèle de Gramme, par exemple) est loin d'être aussi grande qu'on aurait tendance à le supposer.

33. Il importe de remarquer que, dans le cas spécial où le champ magnétique est produit, non par un aimant permanent, mais par un électro-aimant excité par le courant du circuit mobile, le déplacement des frotteurs est insensible pour de petites vitesses de rotation. Le champ magnétique et le champ galvanique sont en effet, dans ce cas, fonctions l'un de l'autre. Dans de certaines limites, leurs intensités croissent ensemble sans qu'aucune devienne prédominante. La déformation du champ fixe n'est donc que peu accusée, et, puisque c'est elle qui commande le déplacement des contacts, celui-ci ne prendra de valeurs importantes qu'à partir du moment où l'intensité du courant excitateur parvient à *saturer* les électro-aimants.

L'aimantation de ces derniers est, comme on le sait, d'abord sensiblement proportionnelle à l'intensité du courant qui les parcourt; puis, cette intensité venant à s'accroître, la proportionnalité cesse de subsister. Enfin, le moment magnétique paraît tendre vers une limite fixe et ne pas se modifier d'une façon apparente sous l'influence d'un courant de plus en plus énergique.

L'expression

$$K \operatorname{arc} \operatorname{tang} I$$

m'a semblé, dans ces conditions, représenter avec assez d'exactitude l'intensité du champ magnétique d'un électro-aimant caractérisé par la constante K lorsqu'un courant d'intensité I traverse le fil de sa bobine.

Dans les machines Gramme à électro-aimants, c'est le même courant qui détermine le champ magnétique et le champ galvanique. Le champ magnétique peut alors se représenter, à un facteur constant près, par

$$C_m = \text{arc tang}\, C_g.$$

Portons cette valeur de C_m dans la formule du n° 32, et nous aurons

$$\text{tang}\, \Delta_1 = \frac{C_g}{\text{tang}\,(\text{R arc tang}\, C_g)}$$

pour calculer les valeurs de Δ en fonction de l'intensité du courant et de la résistance du circuit.

Si, dans ce genre de machines, le signe du courant excitateur vient à changer, la rotation continuera à s'effectuer dans le même sens qu'auparavant. L'expression précédente ne change en effet pas de signe lorsque C_g devient positif ou négatif. Le sens de la rotation est déterminé par celui des enroulements de la bobine mobile et des bobines des électro-aimants.

34. Les valeurs de Δ et de Δ_1 peuvent s'exprimer en fonction de la résistance du circuit total et du nombre de tours qu'exécute l'anneau dans l'unité de temps, c'est-à-dire de sa vitesse.

Soit d'abord la machine à aimant permanent.

Si l'on appelle E la force électromotrice développée dans le circuit pendant sa rotation, et N le nombre de lignes de force coupées par ce circuit pendant l'unité de temps, on sait que (¹)

$$E = N.$$

(¹) Toutes les égalités suivantes n'expriment réellement que des proportionnalités.

D'autre part, les lois d'Ohm donnent

$$E = RI,$$

et nous pouvons poser

$$I = C_g.$$

De ces trois équations on peut déduire

$$C_g = \frac{N}{R}.$$

Mais la vitesse V de rotation est proportionnelle à N; on a donc

$$C_g = \frac{V}{R}.$$

Portant cette valeur dans l'expression de Δ, nous aurons

$$\operatorname{tang} \Delta = \frac{V}{R \operatorname{tang}(RC_m)},$$

Soit à présent la machine à électro-aimant.

Ici, en raison de la dépendance des champs magnétique et galvanique, la force électromotrice sera d'abord proportionnelle au carré de la vitesse de l'anneau, pour devenir enfin proportionnelle à la simple vitesse lorsque les électro-aimants seront saturés.

Supposons qu'il s'agisse d'abord de vitesses très-faibles; nous aurons

$$E = V^2,$$

et, en tenant compte de la petitesse de V, nous trouverons à la limite

$$\operatorname{tang} \Delta_1 = \frac{1}{R}.$$

Si, au contraire, les vitesses sont très-considérables,

$$E = V$$

et l'expression de tang Δ_1 devient à la limite

$$\tang \Delta_1 = \frac{V}{R \tang R}.$$

En réalité, toutes les équations précédentes représentent des proportionnalités, et non des égalités.

On pourrait également exprimer Δ et Δ_1 en fonction de la vitesse et du travail, car on a

$$W = KRI^2 = K\frac{E^2}{R}.$$

Mais $E = V$, à un facteur constant près, d'où l'on peut tirer

$$R = K\frac{V^2}{W},$$

expression que l'on substitue à celle de R dans celles de Δ et de Δ_1.

Proportionnalité de la force électromotrice et de la vitesse de rotation dans une machine à champ magnétique constant.

35. Lorsqu'on veut chercher à vérifier cette proportionnalité, on peut se servir de plusieurs méthodes, dont les plus simples sont les deux qui suivent :

1° En s'appuyant sur la formule d'Ohm $E = RI$, on mesurera, à l'aide d'un galvanomètre, l'intensité I du courant à travers un circuit de résistance R ;

2° En opposant au courant de la machine celui d'une source électrique de force électromotrice connue, on ramènera au zéro la déviation galvanométrique.

Les déformations précédemment étudiées du champ magnétique vont montrer les précautions à prendre dans les deux cas.

Dans la première méthode, fondée sur la mesure de l'intensité, la valeur particulière de la résistance nécessite, comme nous l'avons vu, une position spéciale des frotteurs. Si l'on effectuait une série de déterminations à l'aide de circuits de résistances différentes, il faudrait, à chaque fois, déplacer les prises de contact, sous peine de ne pas obtenir de résultats comparables.

Dans la méthode d'opposition, au contraire, le champ galvanique est toujours ramené à zéro, quelle que soit la résistance du circuit. Le diamètre de commutation devra, par conséquent, toujours coïncider avec la droite cc' de la *fig.* 23 de la *Pl. I.*

Ce dernier procédé présente donc sur le premier un très-grand avantage au point de vue des facilités expérimentales.

Vérifications expérimentales.

36. Je ne donnerai pas ici le résultat de mes propres expériences, d'ailleurs peu nombreuses, sur ce sujet; mais un récent travail de MM. Mascart et Angot ([1]) renferme des déterminations faites avec un soin extrême. On peut souvent reprocher aux observateurs d'interpréter leurs expériences avec une partialité quelquefois inconsciente. Ici j'aurai l'heureuse fortune de trouver une confirmation des idées que je viens d'exposer dans des expériences entreprises par d'autres et certainement dégagées de toute préconception.

Le tableau suivant contient les valeurs correspondantes de la vitesse d'une bobine de Gramme, de la résistance du circuit et de l'intensité du courant. La force électromotrice E a été, chaque fois, calculée pour un tour de l'anneau par seconde, et, dans chaque colonne, E devrait être constant pour établir la proportionnalité avec la vitesse de rotation.

([1]) *Journal de Physique,* novembre 1878.

VITESSE.		RÉSISTANCE.		INTENSITÉ.	
Tours de l'anneau par seconde.	E en volts.	Valeur du circuit en ohms.	E en volts.	Courant en webers.	E en volts.
3,1	0,79	15	0,78	0,00025	0,74
3,6	0,82	44	0,82	0,00181	0,74
6,7	0,77	100	0,79	0,0230	0,77
9,1	0,77	200	0,77	0,058	0,81
15,4	0,75	1000	0,78	0,262	0,78
28,6	0,75	5000	0,74	0,742	0,78
43,5	0,74	10000	0,74		
50,0	0,75	20000	0,74		

A la fin de leur travail, MM. Mascart et Angot disent n'avoir pas déplacé les points de contact des frotteurs ; ils attribuaient, d'ailleurs, la cause de tels déplacements à la force coercitive du fer de l'anneau mobile.

La première colonne, où la vitesse seule varie, montre que la valeur de E a d'abord augmenté jusqu'à 0,82, puis graduellement diminué jusqu'à 0,74. Nous pouvons en conclure que la position des frotteurs, dans les conditions de l'expérience, était la plus favorable pour la vitesse 3,6 qui a donné la valeur maxima de E. Ces frotteurs étaient trop déplacés pour les vitesses inférieures à 3,6, et pas assez pour les vitesses supérieures. Les inégalités de E s'expliquent ainsi parfaitement.

La deuxième colonne indique les seules variations de la résistance. J'ai montré que, toutes choses égales d'ailleurs, le diamètre de commutation devait être d'autant plus déplacé que la résistance était plus petite.

Nous voyons que pour la résistance 44 la valeur de E est maxima ; la position des frotteurs correspondait donc à cette résistance particulière. Pour les résistances plus faibles, les frotteurs n'étaient pas assez déplacés ; pour les résistances plus grandes, ils l'étaient trop.

La troisième colonne est celle où l'intensité seule varie.

Je laisse au lecteur le soin de vérifier ici l'accord des expériences avec les déformations du champ magnétique : il est aussi net que dans les deux cas qui précèdent.

MM. Mascart et Angot donnent également, dans la même étude, une série d'expériences tendant à vérifier la proportionnalité de la force électromotrice et de la vitesse de rotation par la méthode d'opposition. La constance de E y est beaucoup plus grande. On peut aisément se l'expliquer, puisque, dans cette méthode, les frotteurs doivent occuper les mêmes positions, quelle que soit la résistance du circuit.

Si la mesure de la force électromotrice était déterminée à l'aide d'un électromètre, la même constance devrait se rencontrer dans les résultats, car, là encore, l'intensité du champ galvanique serait nulle, puisque la machine fonctionnerait à circuit ouvert.

37. Mais c'est ici qu'apparaît l'influence de la force coercitive du fer de l'anneau, puisque elle seule peut être en jeu dans le cas qui nous occupe. Et, en effet, les écarts de E ou de $\frac{p}{n}$, dans le tableau suivant, montrent bien la valeur que peut atteindre le retard à l'aimantation.

Nombre de tours de l'anneau par seconde. n.	Nombre d'éléments Daniell en opposition. p.	Rapport $\frac{p}{n}$.
10,2	3	0,294
14,0	4	0,286
17,8	5	0,281
22,2	6	0,270
25,5	7	0,275
29,5	8	0,272

Pour les quatre premières déterminations, les frotteurs étaient trop déplacés, et la vitesse de rotation a dû, par conséquent, être supérieure à ce qu'elle aurait été si le

diamètre de commutation avait occupé sa situation régulière. Les deux dernières accusent encore des divergences de E, mais moins prononcées que les précédentes. C'est que, ainsi qu'il était permis de le prévoir, les lignes de force résistent de plus en plus à l'entraînement que le mouvement de l'anneau leur fait subir.

Les troisièmes décimales des deux derniers rapports $\frac{p}{n}$ peuvent être mises sur le compte d'erreurs expérimentales.

Nous pouvons donc constater que la force coercitive du fer de la bobine nécessite un déplacement angulaire des frotteurs de 10 degrés à peine, pour une vitesse de rotation de 1770 tours par minute, tandis que j'ai pu obtenir des déplacements de près de 70 degrés en exagérant l'intensité du champ galvanique par rapport à celle du champ magnétique.

38. J'ai dit, au n° **32**, qu'une même déformation de la ligne de force AB (*fig.* 23) peut provenir aussi bien d'une intensité n du champ galvanique que d'une intensité $\frac{1}{n}$ du champ magnétique.

J'emprunterai encore au Mémoire de MM. Mascart et Angot un tableau d'expériences dans lequel je trouverai la confirmation de ce que j'avance.

Ces physiciens employaient une machine de Gramme à aimant Jamin. En enlevant une partie des lames d'acier qui composent cet aimant, ils étaient maîtres de diminuer comme ils le voulaient l'intensité du champ magnétique de la machine. La force électromotrice pouvait être ainsi mesurée dans des conditions toutes différentes :

23 lames.		15 lames.	
Nombre de tours par seconde.	E.	Nombre de tours par seconde.	E.
6,1	0,269	6,1	0,167
3,3	0,254	3,3	0,163

L'intensité du champ a été évaluée par la méthode de Weber et trouvée :

Pour 23 lames, égale à	....	38,2
» 15 » à	....	23,0

Dans toutes les expériences, la position des balais restait invariable. Si, dans ce cas, la force électromotrice était proportionnelle à la vitesse de rotation, on devrait avoir

$$\frac{0,269}{0,254} = \frac{0,167}{0,163},$$

puisque le rapport des vitesses est le même dans les deux déterminations.

Mais la position des frotteurs dans le champ de quinze lames aurait dû être modifiée de manière à exagérer encore la situation anormale en apparence qu'ils occupent dans le champ de vingt-trois lames. Cette modification n'ayant pas été faite, les résultats obtenus dans le champ le plus faible doivent accuser une divergence plus grande de la proportionnalité à vérifier que dans le champ le plus intense.

On peut en conclure que

$$\frac{0,269}{0,254} < \frac{0,167}{0,163}.$$

En effet, tous calculs faits, on trouve bien

$$33247 < 42418.$$

39. L'ensemble des résultats précédents permet de préciser quelle est la part que l'on doit attribuer à la force coercitive dans le déplacement du diamètre de commutation; mais il importe de remarquer que l'anneau de fer exerce ici deux influences bien distinctes :

1° Le temps que nécessite son aimantation ou sa désaimantation oblige à déplacer les frotteurs, dans le sens de la rotation, d'un angle que nous avons reconnu, par expé-

rience, être très-faible (10 degrés au maximum pour 1770 tours par minute).

2° La présence de cet anneau exalte l'intensité du champ magnétique et en réduit, par conséquent, la déformation.

Envisagée de cette manière, et si nous considérons la machine employée comme source de courant, l'armature de fer tend à ramener le diamètre de commutation en sens inverse de la rotation, par rapport à la position qu'il occuperait si l'armature était supprimée, comme on pourrait le faire dans la machine d'Alteneck.

Cette dernière influence est considérable et l'emporte de beaucoup sur la première. On se trouve ainsi amené à attribuer aux armatures un rôle absolument opposé à celui qu'on leur supposait jusqu'à présent. Loin d'être cause du déplacement des frotteurs dans les machines qui engendrent un courant, l'anneau de fer réduit, au contraire, ce déplacement dans une énorme proportion pour un champ galvanique constant.

40. Quant aux vérifications expérimentales de la première Partie du présent Mémoire, elles sont aussi satisfaisantes qu'il est possible ; elles sautent même aux yeux, sans qu'il soit besoin de faire des évaluations numériques.

J'ai réalisé toutes les expériences décrites à l'aide de circuits formés d'un gros fil de cuivre ou d'aluminium. Le champ magnétique n'avait pas besoin d'être puissant, surtout dans le cas où je voulais constater sa déformation par le champ galvanique.

Le courant provenait d'une pile Thomson, dont j'employais de 1 à 10 éléments.

CONCLUSIONS.

1° La théorie des machines de Gramme et d'Alteneck se rattache directement à celle de la roue de Barlow et de la machine de Faraday, et ces dernières machines reposent sur

le premier principe établi par Ampère, à savoir qu'un courant mobile tend à se placer de manière que l'observateur qui le personnifie voie le pôle austral à sa gauche et le pôle boréal à sa droite.

2° L'armature de fer doux de la machine d'Alteneck ne sert qu'à renforcer le champ magnétique dans la région où se meuvent les fils du circuit mobile.

3° L'armature annulaire de fer doux de la machine de Gramme a la même influence que la précédente, mais ce n'est pas là son rôle caractéristique. Ce rôle consiste à soustraire les fils internes des spires de la bobine à l'action normale des lignes de force du champ.

4° Le déplacement angulaire des frotteurs des machines précédentes ne peut être attribué au seul retard à la désaimantation de l'anneau de fer doux, puisque ce déplacement est encore nécessité et peut même acquérir une valeur plus considérable dans des formes dérivées de ces machines où n'existe aucune armature de fer doux.

Les règles qui président à ce phénomène général sont les suivantes :

« Lorsqu'on veut obtenir le meilleur effet possible du système constitué par un circuit mobile animé d'un mouvement de rotation dans un champ magnétique :

» 1° Si ce mouvement est causé par le passage du courant d'une source étrangère, le diamètre des prises de contact doit être déplacé, *en sens inverse de la rotation,* d'un angle d'autant plus grand que l'intensité du champ galvanique est plus considérable et que l'intensité du champ magnétique est plus faible.

» 2° Si ce mouvement est destiné, au contraire, à engendrer un courant continu dans l'appareil, le même diamètre doit être déplacé *dans le sens de la rotation.* »

RECHERCHES SUR L'INDUCTION UNIPOLAIRE, L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE ET L'AURORE BORÉALE;

PAR M. EDLUND,
Professeur de Physique à l'Académie royale des Sciences de Suède.

---

§ I. — *De l'induction unipolaire.*

Nous nous représentons un aimant d'acier à position verticale, qui peut être aisément mis en rotation autour de son axe géométrique ; nous nous figurons, en outre, cet aimant entouré d'un manchon métallique en forme de cylindre, pouvant tourner également autour du même axe. Si l'on fait passer dans ce manchon le courant d'une pile, de manière que l'une des électrodes soit en contact avec le manchon au voisinage des pôles de l'aimant, et la seconde électrode dans un point situé entre les deux pôles, l'expérience nous apprend que le manchon entre en rotation autour de l'aimant. Le sens de la rotation dépend de celui du courant dans le manchon, comme aussi de la situation des pôles. Quant à l'aimant même, il reste dans un état d'immobilité parfaite, et le courant galvanique n'exerce, par conséquent, sur lui aucune action rotatoire. Il est donc possible de tourner par la voie mécanique l'aimant autour de son axe, sans que l'action réciproque de l'aimant et du courant y porte le moindre obstacle. La seule résistance qu'il s'agit de surmonter dans la rotation mécanique de l'aimant est occasionnée par le frottement dans les coussinets de l'axe, etc., résistance qui n'a, par suite, rien à démêler avec le courant. Dans un précédent travail (1), j'ai démontré que, suivant la Théorie mécanique de la chaleur, chaque phénomène de l'espèce citée doit être accompagné

d'un phénomène d'induction unipolaire. En effet, si l'on enlève la pile et qu'on la remplace par un galvanomètre inséré entre les deux électrodes mentionnées, et en contact avec le manchon, le galvanomètre indique la naissance d'un courant dès que l'on met mécaniquement le manchon en rotation. La force électromotrice se compose ici du travail mécanique nécessaire pour surmonter la réaction de l'aimant sur le courant dans la partie du circuit mise en rotation. Cette espèce d'induction a reçu le nom d'*induction unipolaire*. Le courant produit est proportionnel à la vitesse du manchon. Il va de soi que la rotation mécanique simultanée de l'*aimant* n'amène aucune augmentation dans le courant produit par la rotation du *manchon,* vu que cette augmentation d'intensité se ferait sans la consommation d'un travail mécanique correspondant, ce qui serait parfaitement absurde. Plucker a aussi prouvé par la voie expérimentale que, dans ce cas-ci, la rotation de l'*aimant* n'est pas capable de produire un courant. En voici une autre raison : il a été démontré par l'expérience que l'aimant peut être remplacé dans le cas en question par un solénoïde produisant le même effet que lui ([2]). J'ai fait voir moi-même, à une précédente occasion ([3]), que la *rotation* du solénoïde autour de son axe est hors d'état de produire un courant d'induction unipolaire, que ce courant provienne d'un fluide unique ou de deux fluides en mouvement translatoire. C'est donc, dans ce cas-ci, la rotation *du manchon* autour de l'aimant qui donne naissance au courant induit unipolaire observé, tandis que la rotation de l'*aimant* autour de son axe n'a rien à faire

---

([1]) *Bulletin* (Öfversigt) *des travaux de l'Académie des Sciences,* 1877; *Wiedemanns Annalen,* t. II, p. 347.

([2]) *Bulletin* (Öfversigt) *des travaux de l'Académie des Sciences,* avril 1877. *Pogg. Ann.,* t. CLX, p. 604.

([3]) *Bulletin* (Öfversigt) *de l'Académie des Sciences,* janvier 1877. *Pogg. Ann.,* t. CLX, p. 617.

avec le phénomène, comme l'ont admis plusieurs physiciens.

Si l'on relie ensemble l'aimant et le manchon de manière qu'ils forment un corps solide et invariable, l'aimant est entraîné dans le sens de la rotation du manchon, sans qu'il en résulte, comme on vient de le voir, de modification dans l'induction de l'aimant. L'aimant agit en ce cas, sur le manchon, comme si le premier était immobile et le dernier seul en rotation. L'opinion émise par plusieurs physiciens que l'aimant ne peut pas produire une induction unipolaire dans un conducteur avec lequel il est intimement uni, cette opinion n'est donc pas juste. Si le rayon du manchon cylindrique est suffisamment réduit pour que le manchon soit en contact complet avec l'aimant, cette circonstance n'empêchera pas qu'une induction n'ait lieu dans le manchon ; et, puisque cela se fera pour une épaisseur quelconque du manchon, on peut même l'enlever totalement et mettre les électrodes du galvanomètre en contact immédiat avec l'aimant, sans que l'induction cesse pour cela. L'aimant remplit alors lui-même les fonctions de conducteur, et l'induction ne vient pas de ce qu'il est mis en rotation comme aimant, mais de ce qu'il est mis en rotation comme conducteur. Nous sommes ici en présence du phénomène d'induction unipolaire produit pour la première fois par W. Weber [1].

Si maintenant l'on demande comment il se fait qu'un courant soit possible dans ce cas, on pourra répondre que cela doit nécessairement avoir lieu, si notre idée sur la nature du courant galvanique est correcte, savoir, qu'il consiste dans le mouvement translatoire d'un fluide allant dans le sens du courant positif [2] ou de deux fluides sui-

---

[1] *Pogg. Ann.*, t. LII, p. 353.

[2] *Théorie des phénomènes électriques* (*Mémoires de l'Académie royale des Sciences*, t. XII. Stockholm, P.-A. Norstedt et Söner; Leipzig, F.-A. Brockhaus).

vant des directions opposées. Pour comprendre la nécessité de la production d'un courant dans le cas en question, on peut adopter indifféremment l'une ou l'autre des opinions précitées. J'ai rappelé, dans le Mémoire mentionné plus haut, le fait connu qu'un anneau de métal entourant un aimant et traversé par un courant galvanique se transporte, s'il est mobile, le long de cet aimant. Il s'arrête au milieu, où il prend une position d'équilibre stable, si son courant galvanique suit la même direction que les courants moléculaires dont on se figure que l'aimant est formé. Si, par contre, le courant de l'anneau suit une direction opposée, l'anneau aura un équilibre instable au milieu de l'aimant, et, si on l'écarte de cette position, il s'éloignera toujours davantage du milieu jusqu'à dépasser les pôles de l'aimant. Ce mouvement de l'anneau est déterminé par la loi qui règle l'action d'un pôle magnétique sur un élément de courant, loi qui, comme on le sait, se formule de la manière suivante : Un seul pôle magnétique agit sur un élément de courant ds avec une force directement proportionnelle au produit du moment magnétique M du pôle, de l'intensité i du courant et du sinus de l'angle λ entre l'élément de courant et la droite reliant le pôle de l'aimant au même élément, et inversement proportionnelle au carré de la distance r entre ces derniers. La force en question peut donc s'exprimer par $\frac{\mathrm{M}i\sin\lambda\, ds}{r^2}$. Le point d'application de la force se trouve dans l'élément de courant, et sa direction est perpendiculaire au plan qui passe par le pôle magnétique et par l'élément de courant. Le sens dans lequel la force agit suivant ladite direction dépend, du reste, de la direction du courant et de la nature du pôle.

Quand on met le manchon en rotation autour de l'aimant immobile, le fluide électrique ou les deux fluides, si l'on en admet deux, se mettent en rotation dans la même

direction. Ils forment donc des courants à circulation horizontale autour de l'aimant vertical, et leur intensité sera proportionnelle à la vitesse de la rotation.

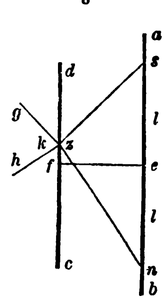
La seule différence entre ces courants et les courants galvaniques ordinaires, c'est que, si les fluides sont au nombre de deux, ces deux fluides suivent la même direction, tandis que, dans les courants galvaniques ordinaires, ils suivent des directions contraires l'une à l'autre. Mais l'action de l'aimant sur le courant négatif est, d'après les idées ordinaires, la même que sur un courant positif allant dans le sens inverse. Or, les pôles de l'aimant agissent, en vertu de la loi précitée, sur les courants produits par la rotation du manchon, et la conséquence en sera que le manchon recevra un excédant d'éther (fluide électropositif) à ses deux extrémités et un déficit d'éther (fluide électronégatif) au milieu, ou *vice versa,* suivant le sens de la rotation et la position des pôles. Dans un fil conducteur dont l'une des extrémités est en contact avec le milieu et l'autre avec un des bords du manchon, il en naîtra nécessairement un courant galvanique. La direction du courant ainsi produit et l'accroissement de son intensité avec celui de la vitesse de rotation sont totalement conformes à l'expérience.

On peut maintenant opposer l'objection suivante à cette manière de voir : si la naissance du courant induit unipolaire dépend de ce que les molécules électriques, en même temps que le conducteur dans lequel elles se trouvent, entrent en mouvement autour de l'aimant, il devra aussi naître un courant induit semblable si, le conducteur et les molécules électriques restant au repos, l'aimant est mis en mouvement autour d'elles, vu que le phénomène ne peut dépendre que du mouvement relatif entre l'aimant et ces molécules. S'il est donc prouvé, par les expériences précitées, que l'aimant agit sur une molécule électrique en rotation autour de lui, il devra également agir sur elle si

celle-ci est au repos tandis que l'aimant lui-même se meut autour d'elle. Cela doit être certainement le cas, et nous en verrons des exemples dans la suite.

Figurons-nous le manchon cylindrique divisé en colonnes verticales, chacune présentant une section égale à l'unité. Pour déterminer quantitativement la force d'induction produite dans le manchon par l'aimant, il suffira de prendre l'une de ces colonnes en considération. Représentons l'aimant par *ab* (*fig.* 1), et nommons *dc* l'une des

Fig. 1.



colonnes susdites, dont la distance de l'aimant sera indiquée par r; s désigne le pôle sud, n le pôle nord, et $2l$ la distance de l'un à l'autre Supposons que le manchon vu de dessus tourne autour de l'aimant, dans le sens inverse à celui des aiguilles d'une montre. L'excédant d'éther (le fluide électropositif) se rassemblera alors aux deux extrémités de la colonne, et le déficit d'éther se fera sentir au milieu. Si l'on désigne la vitesse angulaire par v, la vitesse de la colonne sera égale à rv. L'intensité d'un courant peut être exprimée par qav, où q indique une constante, a la section du conducteur et v la vitesse du fluide électrique. L'intensité du courant produit par la rotation dans un élément dz quelconque pourra alors être désignée par $qrvdz$, où q est une constante, et rv, comme on l'a vu, la vitesse de l'élément précité. Si l'on mène des droites depuis les

deux pôles jusqu'à l'élément dz situé en k, à la distance z de la ligne fe, et si kg et kh sont perpendiculaires aux lignes mentionnées, le pôle sud poussera l'éther (le fluide électropositif) suivant kg, tandis que le pôle nord le conduira suivant kh. En désignant par M l'intensité des pôles magnétiques, la première force sera représentée par $\frac{+\mathrm{M}qrv\,dz}{(l-z)^2+v^2}$, et la seconde par $\frac{\mathrm{M}qrv\,dz}{(l+z)^2+r^2}$. La composante de ces forces, suivant la colonne cd, sera alors

$$\frac{+\mathrm{M}qr^2v\,dz}{[(l-z)^2+r^2]^{\frac{3}{2}}}-\frac{\mathrm{M}qr^2v\,dz}{[(l+z)^2+r^2]^{\frac{3}{2}}}.$$

En supposant la longueur du manchon égale à la distance entre les pôles de l'aimant, soit $2l$, on obtiendra, par l'intégration, la force conduisant le fluide électrique du manchon à ses extrémités, savoir :

$$\text{(A)}\qquad 2\mathrm{M}qvl\left[\frac{1}{(l^2+r^2)^{\frac{1}{2}}}-\frac{1}{(4l^2+r^2)^{\frac{1}{2}}}\right].$$

Cette dernière expression constitue la force électromotrice produite.

Nous allons voir maintenant si cette expression de la force électromotrice est conforme aux exigences de la Théorie mécanique de la chaleur. Si l'on fait passer un courant égal à l'unité par la colonne de f à d, celle-ci commence à se mettre en rotation dans le sens opposé à celui dans lequel nous la considérions se mouvoir par l'action de la force mécanique extérieure. Il est facile de calculer, d'après la loi donnée précédemment, la force par laquelle l'aimant agit sur le courant. Les carrés des distances des deux pôles à l'élément dz situé à la distance z de la ligne fe sont $(l-z)^2+r^2$ et $(l+z)^2+r^2$, et le $\sin\lambda$ est, dans les deux cas, égal à $\frac{r}{[(l-z)^2+r^2]^{\frac{1}{2}}}$ et à $\frac{r}{[(l+z)^2+r^2]^{\frac{1}{2}}}$.

La force par laquelle l'aimant agit sur le courant dans la direction normale au plan qui contient les pôles de l'aimant et l'élément dz est donc

$$-\frac{\mathrm{M}r\,dz}{[(l-z)^2+r^2]^{\frac{3}{2}}}-\frac{\mathrm{M}r\,dz}{[(l+z)^2+r^2]^{\frac{3}{2}}},$$

dont l'intégrale, entre les limites indiquées, est

$$(\mathrm{B}) \qquad \frac{2\mathrm{M}l}{r}\left[\frac{1}{(l^2+r^2)^{\frac{1}{2}}}-\frac{1}{(4l^2+r^2)^{\frac{1}{2}}}\right].$$

Il a été démontré, dans mon Mémoire (¹), que, suivant la Théorie mécanique de la chaleur, la force électromotrice d'induction, résultant de la rotation du manchon avec une vitesse de $w = rv$, doit être égale à une constante (dont la valeur dépend de l'unité choisie pour désigner l'intensité du courant) multipliée par le produit de l'expression (B) et de rv. En multipliant rv par cette expression, on retrouve effectivement l'expression (A) donnée précédemment.

On obtient donc le résultat suivant : si l'on admet, dans le cas en question, que l'induction unipolaire est produite par l'action de l'aimant sur les courants dus à ce que les molécules électriques sont entraînées dans le sens de la rotation du manchon, on obtiendra, pour la force électromotrice, une expression conforme aux exigences de la Théorie mécanique de la chaleur.

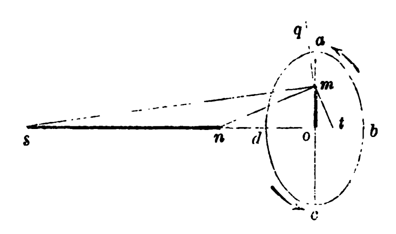
Nous traiterons maintenant un autre cas d'induction. sn (*fig.* 2) représente un aimant puissant, dont le pôle sud est en s et le pôle nord en n, et $abcd$ est une plaque de métal circulaire ayant son centre dans le prolongement de l'axe géométrique de l'aimant, et dont le plan est perpen-

---

(¹) *Wiedemanns Ann.*, t. II, p. 347.

diculaire au même axe. Si l'on met la plaque en rotation autour de l'axe *so*, le fluide électrique sera entraîné dans le sens de la rotation, et la vitesse d'une molécule électrique sera proportionnelle à sa distance du centre *o*. Que l'on se figure maintenant un plan contenant l'axe de l'aimant et un élément électrique *dz* situé en *m*, à la distance *r* du centre de la plaque. Que l'on tire ensuite dans ce plan les droites *mq* et *mt* respectivement perpendiculaires aux lignes *sm* et *nm*. La droite *mq* est alors perpendiculaire au plan qui passe par le pôle sud et la tangente de l'orbite de l'élément *dz*, et la droite *mt* est perpendiculaire au plan

Fig. 2.



passant par la même tangente et le pôle nord. La plaque étant en rotation dans la direction indiquée par les flèches, l'élément électrique est poussé par le pôle sud vers *q*, et par le pôle nord vers *t*. Soit *l* la distance entre les pôles, *p* la distance du pôle nord au centre de la plaque, *r* la distance de ce dernier au point *m*, et M la force des pôles; soit, en outre, *k* une constante et *v* la vitesse de rotation de la plaque : la force par laquelle l'élément *dz* est poussé par le pôle sud vers la périphérie de la plaque (ou, ce qui revient au même, la composante de l'action du même pôle sur *dz* suivant le plan de la plaque), cette force, disons-nous, sera donnée par $\frac{k\mathrm{M}vr(l+p)dz}{[(l+p)^2+r^2]^{\frac{3}{2}}}$, et la force par laquelle le pôle nord cherche à conduire le même élément

vers le centre de la plaque sera exprimée par $\frac{k\text{M}\, \sigma r p\, dz}{(p^2+r^2)^{\frac{2}{3}}}$.

En rendant ces deux expressions égales, on obtiendra la valeur de r, pour laquelle les deux forces se font équilibre. On obtient cette valeur de l'équation

$$r^2 = (l+p)^{\frac{4}{3}}\, p^{\frac{2}{3}} + (l+p)^{\frac{2}{3}} p^{\frac{4}{3}}.$$

Le cercle, dont le rayon a cette valeur, peut s'appeler le *cercle neutre*. Si l'on prend, par exemple, $l = 10$ et $p = 5^c$ on obtient $r = 12^c,7$. Les molécules électriques, situées entre le *cercle neutre* et la périphérie de la plaque, sont conduites par la force magnétique vers cette périphérie, et celles qui se trouvent entre ce cercle et le centre sont poussées vers ce dernier. Comme le montre la formule, la valeur de r du cercle neutre augmente avec l et p. Si l'on touche la plaque en dehors du cercle neutre avec les extrémités des électrodes d'un galvanomètre, celui-ci indique un courant qui, du point de contact situé le plus près de la périphérie, se rend par le galvanomètre à l'autre point de contact. Si, au contraire, les deux points de contact sont situés entre le cercle neutre et le centre de la plaque, le courant passe, par le galvanomètre, du point de contact situé le plus près du centre à l'autre point de contact. Si le cercle neutre se trouve entre les deux points de contact, les positions de ces derniers peuvent être choisies de manière à ne donner naissance à aucun courant. Si la plaque se meut dans le sens inverse, le fluide électrique se rassemble autour du cercle neutre, et le courant change de direction en conséquence. Ces déductions de la théorie ont été vérifiées par les observations de M. Felici [1].

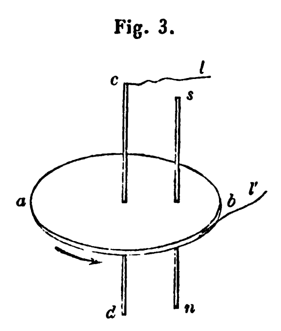
Plücker a étudié par la voie expérimentale le cas suivant. Par le centre d'un disque de métal *ab* (*fig.* 3) passe

---

[1] *Annales de Chimie et de Physique* (3e série), t. XLIV, p. 343.

un axe *cd* du même métal, autour duquel le disque peut être mis en rotation. Plus près de la circonférence du disque, est percé un trou dans lequel on a fait entrer un aimant *sn*, de telle sorte que son milieu soit dans le plan du disque, et son axe parallèle à celui de rotation. Si la rotation s'opère dans la direction indiquée par la flèche, les pôles de l'aimant ayant la position indiquée, on obtient, en unissant par un fil conducteur l'une des extrémités de

Fig. 3.



l'axe de rotation à la circonférence du disque, un courant galvanique passant, par le fil, de l'extrémité de l'axe à la circonférence du disque. Le courant suit, en conséquence, la même direction que si le disque avec son axe était en rotation autour de l'aimant (¹).

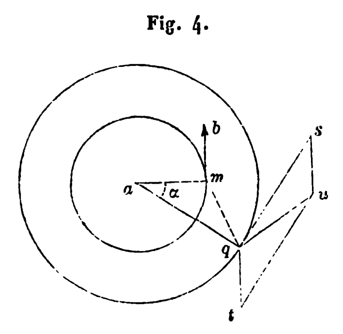
D'après ce qui précède, l'induction à un point quelconque du conducteur dépend du mouvement de ce point par rapport à l'aimant regardé comme fixe. Comme on le sait, ce mouvement relatif ne subit aucune modification, si l'on donne tant à l'aimant qu'au point en question des vitesses égales en grandeur et en direction. Ainsi, pour ce qui concerne en premier lieu l'induction dans l'axe même de rotation, elle est facile à déterminer par le procédé suivant :

(¹) *Pogg. Ann.*, t. LXXXVII, p. 352.

on donne à l'axe de rotation et à l'aimant une vitesse égale, mais opposée à la vitesse actuelle de l'aimant. Celui-ci entre donc au repos, et l'axe se met en rotation autour de ce dernier dans la direction indiquée par la flèche. L'induction dans l'axe devient, par conséquent, la même que si l'aimant était en repos, et que si l'axe tournait autour de ce dernier en gardant sa vitesse angulaire. Pour ce qui concerne l'induction dans le disque de métal, on peut la déterminer de la manière suivante.

Soit *a* (*fig.* 4) le point du disque où l'axe est fixé, *m* ce-

Fig. 4.



lui où le disque est traversé par l'aimant, et *p* la distance entre ces points. La vitesse de rotation peut alors s'exprimer par pv, v désignant la vitesse de rotation angulaire, et celle-ci s'opérant dans la direction de *m* à *b*. Un point *q* quelconque du disque, situé à la distance *r* de l'axe, se mouvra alors avec la vitesse de rotation rv dans la direction *qs*. Maintenant, pour déterminer l'induction au point *q*, on donne à l'aimant et au point prénommé la vitesse pv, mais dans une direction opposée à la direction imprimée préalablement à l'aimant. Celui-ci entre en repos, et le point *q* reçoit une vitesse égale en grandeur et en direction à la résultante des deux vitesses pv et rv, représentées dans la figure par les droites *qt* et *qs*. L'angle *qsw* étant égal à

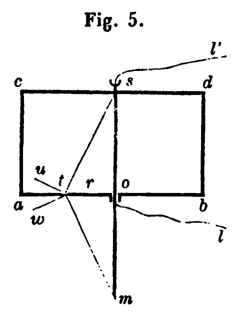
l'angle α, la valeur de cette résultante sera

$$v\sqrt{r^2 + p^2 - 2rp\cos\alpha}.$$

Or, $\sqrt{r^2 + p^2 - 2rp\cos\alpha}$ désigne la distance à laquelle q se trouve de m, le point du disque où l'aimant est fixé. Le point q reçoit, en conséquence, la même vitesse que s'il se mouvait autour de l'aimant fixe. Comme cela s'applique à un point quelconque, il en résulte que l'induction, produite dans le disque pendant qu'il se meut autour de l'axe, sera la même que si le disque se mouvait autour de l'aimant avec la même vitesse de rotation.

Le cas d'induction suivant permet de comparer l'intensité du courant induit avec le résultat obtenu par le calcul: *sm* (*fig.* 5) représente un aimant ayant son pôle sud en *s*

Fig. 5.



et son pôle nord en *m*. Au milieu de l'aimant et auprès du pôle sud sont deux barres de laiton d'égale longueur, *ab* et *cd*, fixées perpendiculairement à l'axe de l'aimant. La barre *ab* est isolée de l'aimant et munie, à son côté inférieur, d'un cylindre qui y est soudé, entourant l'aimant sans être en contact avec lui. Sur ce cylindre glisse un ressort en métal, relié au galvanomètre par le fil métallique *l*. L'autre barre *cd* est, par contre, en contact métallique avec l'aimant. Celui-ci porte, à son extrémité supérieure, un godet de mercure, dans lequel est plongé le second fil *l'*, venant du galvanomètre.

Les deux barres de laiton sont unies entre elles par les cylindres *ac* et *bd* du même métal. Ces cylindres peuvent être placés à des distances diverses de l'aimant, soit un de chaque côté, ou tous les deux du même côté de celui-ci. Si l'on met cet appareil en rotation autour de l'axe de l'aimant, de manière que, vu d'en haut, il se meuve comme les aiguilles d'une montre, on obtient un courant induit passant du godet de mercure, par le galvanomètre, au ressort qui glisse sur le cylindre métallique. Nous allons maintenant calculer l'intensité de ce courant induit.

Un élément électrique dr situé en t, à la distance r de l'aimant, a une vitesse que l'on peut désigner par rv, si v signifie la vitesse angulaire. Sur cet élément les deux pôles exercent des actions égales, l'un suivant la droite tu, l'autre suivant tw. En prenant la composante de ces forces dans la direction ab, on obtiendra, $2l$ signifiant la distance entre les pôles, M le moment magnétique des pôles et k une constante,

$$\frac{2kMvlrdr}{(l + r^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

En prenant l'intégrale de cette expression entre les limites $r = 0$ et $r = r_0$, ce dernier désignant la distance entre l'aimant et le cylindre ac, on obtiendra, pour la force électromotrice totale induite dans la barre ao,

$$(C) \qquad 2kMv - \frac{2kMvl}{(l^2 + r_0^2)^{\frac{1}{2}}}.$$

Les deux pôles cherchent à pousser dans des directions opposées un élément électrique dz de la barre ac, situé à la distance z du point a; mais l'action du pôle sud est plus forte, parce que ce pôle est plus rapproché de dz que l'autre. La résultante de leur action sera

$$kMvr_0^2\,dz \left\{ \frac{1}{[(l-z)^2 + r_0^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{[(l+z)^2 + r_0^2]^{\frac{3}{2}}} \right\}.$$

En intégrant entre les limites $z = 0$ et $z = l$, on obtient, comme expression de la totalité de la force électromotrice induite dans le cylindre *ac*,

$$\text{(D)} \qquad \frac{2kMvl}{(l^2+r_0^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{2kMvl}{(4l^2+r_0^2)^{\frac{1}{2}}}.$$

Pour le calcul de la force électromotrice induite dans la barre *cs*, il suffira de prendre le pôle nord en considération, puisque le pôle sud, agissant perpendiculairement à la longueur de cette barre, ne contribue pas au transport des molécules électriques. Il est, en outre, évident que la force électromotrice induite dans *cs* agit dans une direction opposée à celle des forces induites en *ao* et *ac*. L'expression de cette force sera

$$\text{(E)} \qquad +kMv - \frac{2kMvl}{(4l^2+r_0^2)^{\frac{1}{2}}}.$$

En retranchant l'expression E de la somme de C et de D, on reçoit, pour la totalité de la force électromotrice du courant induit,

$$kMv.$$

Cette force est donc indépendante de la distance entre la barre *ac* et l'aimant, de même que de leurs longueurs. La considération théorique exige, au reste, évidemment que la force soit indépendante de la section du conducteur, et qu'elle ait la même valeur si les deux cylindres de laiton *ac* et *bd* sont introduits à la fois dans l'appareil, ou que ce soit seulement le cas de l'un d'eux (¹). Dans le premier cas, on a deux électromoteurs, mais ils sont placés à côté

(¹) Plücker a tiré de quelques expériences la déduction que la force électromotrice induite d'un conducteur est proportionnelle à la section de ce conducteur et dépendante de sa puissance conductrice (*Pogg. Ann.*, t. LXXXVII, p. 368). L'examen de ses expériences montre toutefois qu'elles n'autorisent nullement à cette conclusion.

l'un de l'autre et, par suite, n'augmentent pas la force électromotrice. Le même fait se présente ici que, lorsqu'on relie entre eux les pôles positifs et les pôles négatifs de deux piles ordinaires, la force électromotrice n'est pas changée, mais la résistance de la pile combinée est diminuée de moitié. Or la résistance dans le circuit *oacs* est extrêmement petite en comparaison de celle du galvanomètre. L'intensité du courant devra donc rester la même, que les cylindres *ac* et *bd* soient introduits tous les deux dans l'appareil ou seulement l'un d'eux, et la distance à laquelle ils se trouvent de l'aimant n'influe pas sur le résultat. C'est ce que prouvent les expériences suivantes, faites avec un appareil de cette espèce.

	Déviations du galvanomètre en divisions d'échelle.
Un seul cylindre placé à 0^{m},045 de distance de l'aimant.	36,0 37,5
Un cylindre placé de chaque côté de l'aimant à une distance de 0^{m},045.	37,0 38,0 37,5
Un seul cylindre placé à 0^{m},045 de l'aimant. .	37,3 38,0

La moyenne des deux premières et des deux dernières observations est 37,2, et celle des trois observations du milieu, 37,5. Le courant induit est donc d'égale intensité avec les deux cylindres comme avec un seul.

	Déviations du galvanomètre en divisions d'échelle.	
Un cylindre de chaque côté de l'aimant, à une distance de 0^{m},085.	35,5 38,0 36,5	36,7
Un seul cylindre, à 0^{m},085 de l'aimant.	37,0 38,0 40,0	38,3

La moyenne de ces six observations est 37,5, par suite, à peu près la même qu'auparavant, quoique la distance de l'aimant ait été presque doublée.

	Déviations du galvanomètre en divisions d'échelle.	
Un seul cylindre à $0^m,03$ de distance de l'aimant.	37,0 37,5 39,5	38,0

Ces observations ont donc vérifié les résultats de la théorie.

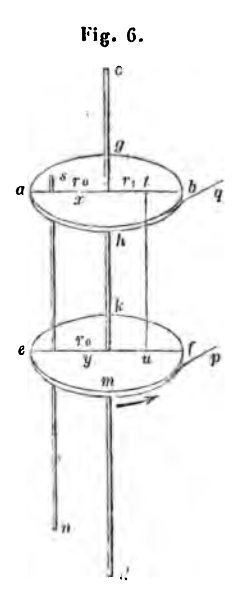
Il est superflu de dire que les déviations précitées sont épurées des faibles courants thermo-électriques produits par l'échauffement des points de contact pendant la rotation. Il est facile d'éliminer ces courants, vu qu'ils sont indépendants du sens de la rotation.

Il fut procédé, après cela, à l'expérience suivante. Deux disques d'ébonite, de dimensions égales, *agbh* et *ekfm* (*fig.* 6), à périphéries revêtues d'une bande de laiton, étaient percés au centre et passés sur un axe *cd*, autour duquel ils pouvaient être mis en rotation. *ab* et *ef* représentent deux règles de laiton fixées aux disques et communiquant en *a* et en *e* avec les bandes de laiton mentionnées, tandis qu'elles en sont isolées en *b* et en *f*, tout en l'étant également de l'axe *cd*; *sn* est un aimant traversant les deux disques sans aucune communication avec les deux règles de laiton; l'un des disques est placé à la hauteur du pôle sud et l'autre au milieu de l'aimant; *tu* est une barre de laiton communiquant avec les deux règles *ab* et *ef*. Cette barre peut être placée à des distances différentes des deux côtés de l'axe. Les ressorts de laiton *q* et *p* glissent sur les bandes de laiton entourant les disques et communiquent de la sorte avec les règles de laiton *ab* et *ef* et la barre *tu*. Ces ressorts sont reliés avec les électrodes du galvanomètre. La rotation de l'appareil autour de *cd*, dans le sens

indiqué par la flèche, donne naissance à un courant électrique qui passe du ressort q, par le galvanomètre, jusqu'à l'autre ressort.

Pendant la rotation, les pôles de l'aimant décrivent autour de l'axe de rotation des cercles dont le rayon est égal à r_0. Leur vitesse peut donc être désignée par $r_0 v$ si v est la vitesse angulaire. La vitesse de la barre tu est $r_1 v$, r_1 désignant sa distance de l'axe de rotation. La vitesse relative

Fig. 6.



de la barre par rapport à l'aimant, considéré comme immobile, sera donc $(r_0 + r_1)v$, ainsi qu'on l'a déjà fait remarquer plus haut. Si la barre passe par les points x et y du même côté de l'axe de rotation où est placé l'aimant, et à la distance r_1 de cet axe, la vitesse relative de la barre par rapport à l'aimant sera $(r_0 - r_1)v$. Ainsi, dans les deux cas, la vitesse relative de la barre sera la même que si l'on considère l'aimant comme immobile, et tant les disques que la barre comme étant en rotation autour de lui

avec la même vitesse angulaire que celle qu'ils ont en réalité autour de l'axe *cd*. Il en est de même des règles de laiton *ab* et *ef*.

Cela posé, supposons que nous fassions deux expériences avec la même vitesse de rotation, mais avec cette différence que dans l'une la barre occupe la place indiquée par la figure, tandis que dans l'autre elle soit placée en *xy*. Dans les deux cas, l'induction sera la même que si l'appareil était en rotation autour de l'aimant immobile. Dans le premier cas, nous avons à considérer l'induction dans le circuit *atue* de même que dans les deux anneaux entourant les disques, et, dans le dernier cas, l'induction dans le circuit *axye* ainsi que dans les mêmes anneaux. Or, le calcul donné ci-dessus a montré que l'induction dans le circuit *atue* est égale à celle du circuit *axye*. Si ces déductions sont justes, il faudra donc que l'intensité du courant induit soit la même sur quelque point que la barre soit placée.

Les expériences donnèrent les déviations suivantes en divisions d'échelle :

	La barre placée du côté de l'axe opposé à l'aimant.		La barre placée du même côté de l'axe que l'aimant.	
	$r_1 = 40^{mm}$.	$r_1 = 24^{mm}$.	$r_1 = 24^{mm}$.	$r_1 = 40^{mm}$.
	17,0	17,0	15,5	16,0
	16,0	16,0	17,2	17,3
	16,2	15,2	17,0	16,0
Moy.	16,4	16,1	16,6	16,4

Ces chiffres pouvant être considérés comme égaux, il en suit, comme le montre aussi le calcul, que l'intensité du courant est indépendante de la position de la barre.

D'après l'exposé qui précède, l'induction unipolaire ne doit pas être considérée comme une véritable induction, mais comme un phénomène électrodynamique ordinaire, dû à ce que l'aimant agit sur les courants électriques formés par le mouvement du conducteur relativement au premier.

Quant à l'action de l'aimant, il est tout à fait indifférent que les courants sur lesquels l'aimant agit soient produits par des forces électromotrices spéciales ou par le fait que le fluide électrique est entraîné dans la direction du mouvement du conducteur. Si l'on veut cependant continuer à regarder les phénomènes unipolaires comme appartenant aux phénomènes d'induction, on sera forcé de distinguer les espèces suivantes d'induction magnétique :

1° L'induction due à ce que l'*action* de l'aimant sur le circuit induit augmente ou diminue, ou en général subit une variation. Cela peut avoir lieu des deux façons suivantes :

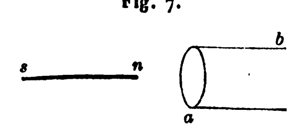
(*a*) Le moment magnétique subit une modification tandis que le circuit induit et l'aimant restent au repos, et, par suite, ne modifient pas leur position relative ;

(*b*) L'aimant et le circuit induit se rapprochent ou s'éloignent l'un de l'autre sans que le moment magnétique en subisse de variation.

2°. L'induction due à la circonstance que le conducteur se meut par rapport à l'aimant, sans qu'il faille nécessairement que la distance des pôles de celui-ci aux différents points du conducteur ait varié, et sans que le moment magnétique soit augmenté ou diminué (induction unipolaire).

Ces diverses espèces d'induction peuvent naturellement se présenter parfois combinées l'une avec l'autre, comme le montre l'exemple suivant. Soient *sn* (*fig.* 7) un ai-

Fig. 7.



mant et *ab* un tube de métal dont l'axe coïncide avec le prolongement de l'axe de l'aimant. Si l'on augmente ou si l'on diminue le moment magnétique, il naîtra dans le tube

de métal des courants induits de l'espèce 1 (a). Si l'on approche ou si l'on éloigne le tube de laiton de l'aimant sans modifier le moment magnétique, il en résultera des courants induits de l'espèce 1 (b), mais aussi simultanément ceux de l'espèce 2. En éloignant ou en rapprochant le tube de l'aimant, les molécules électriques qui se trouvent dans le tube sont entraînées dans la direction du mouvement et forment ainsi de véritables courants électriques, sur lesquels l'aimant agit d'après la loi connue de l'action entre un aimant et un courant électrique. Il est facile de comprendre que ces deux espèces de courants induits vont dans le même sens; mais ceux de l'espèce 2 sont si faibles, en comparaison des autres, qu'ils peuvent à peine être observés en même temps qu'eux. En dernier lieu, si le tube est mis en rotation autour de son axe, les courants induits exclusivement de l'espèce 2 cherchent à se former, et ils deviennent appréciables si l'on relie les deux extrémités du tube aux électrodes d'un galvanomètre.

En faisant servir la théorie qui vient d'être exposée à l'explication des cas d'induction unipolaire connus, on peut se convaincre qu'elle fournit pour chaque cas des résultats conformes à l'expérience. Le principe sur lequel repose la théorie, savoir, que l'aimant agit de la même façon que sur des courants ordinaires sur les courants électriques dus à la rotation du conducteur par rapport à l'aimant, ce principe ne peut, autant que je le puisse voir, donner lieu à aucun doute. La seule objection qu'il fût possible d'y faire, ce serait que, la vitesse que l'on est à même de donner au conducteur étant relativement minime, ces courants deviennent si faibles, que l'action de l'aimant sur eux est, en réalité, inappréciable. Mais on peut répondre à cette remarque que la vitesse des molécules électriques dans un courant galvanique ordinaire n'a jamais été mesurée. Plusieurs physiciens ont admis sur de bonnes raisons que cette vitesse n'est pas très-grande en réalité. Il n'est donc pas

improbable que la vitesse qu'il est possible de donner mécaniquement à un conducteur soit comparable à celle des molécules électriques dans un courant galvanique d'intensité moyenne. Il faut soigneusement distinguer ici entre la vitesse avec laquelle le mouvement électrique se propage d'un lieu à un autre et celle avec laquelle les molécules elles-mêmes se meuvent. Ces deux vitesses ne sont en aucune relation l'une avec l'autre. Aussi, comme l'expérience le montre, la première vitesse peut être extrêmement grande, quoique la dernière soit insignifiante ([1]).

Comme les molécules électriques sont entraînées dans la direction du mouvement du conducteur, il semblerait peut-être, avant plus mûre réflexion, qu'un tube cylindrique mis en rotation autour de son axe dût exercer une action électrodynamique, de la même manière qu'une spirale par laquelle passe un courant galvanique. Cependant une déduction pareille n'est rien moins que justifiée. Si l'on admet deux fluides électriques, l'un positif et l'autre négatif, on remarquera que ces deux fluides sont transportés avec la même vitesse et dans le même sens pendant le mouvement du conducteur. Ainsi, ces courants détruisent mutuellement leurs effets réciproques. Même si l'on admet que les phénomènes électriques proviennent d'un seul fluide, ladite conclusion est prématurée. Pour le prouver, toutefois, il est nécessaire de retourner aux principes de cette théorie, tels qu'ils ont été exposés précédemment par moi ([2]).

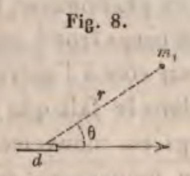
Les phénomènes optiques ont conduit à l'admission que l'éther est attiré par la matière pondérable. Un corps matériel condense l'éther entre ses molécules jusqu'à ce que l'attraction exercée sur une molécule d'éther située en dehors du corps par les molécules propres de celui-ci soit

---

([1]) *Théorie des phénomènes électriques*, p. 10.
([2]) *Ibid.*

égale à la répulsion exercée par l'éther déjà condensé sur la même molécule d'éther. Quand cela est arrivé, le corps matériel n'est plus en état de mettre en mouvement la molécule extérieure d'éther. Outre cette quantité d'éther condensé, que l'on peut considérer comme liée aux molécules propres du corps, il existe de l'éther libre entre ces molécules, et la quantité d'éther libre que le corps contient en son entier doit être égale à la quantité d'éther contenue dans un volume de l'espace vide égal à celui du corps. C'est ce qui a lieu aussi longtemps que le corps est en repos. Si, par contre, le corps est mis en mouvement avec l'éther qu'il contient, non-seulement la répulsion de cet éther, mais aussi l'attraction des molécules propres du corps sur une molécule extérieure d'éther au repos en est modifiée, et cela en vertu du principe établi que « tout ce qui se passe ou s'effectue dans la nature exige un certain temps ». Mais, comme je l'ai déjà indiqué, il ne suit nullement de ce principe que la modification que l'attraction entre les molécules matérielles et la molécule extérieure d'éther subit par le mouvement soit égale à la modification de la répulsion entre les molécules d'éther contenues dans le corps et la même molécule extérieure. J'ai, au contraire, exprimé positivement l'opinion (*Théorie des phénomènes électriques*, p. 72) que l'action entre des espèces différentes de molécules est aussi différente à cet égard. Supposons maintenant que d (*fig.* 8) représente un élément de circuit

Fig. 8.



contenant la quantité m d'éther libre et une quantité m_0 d'éther condensé, et que cet élément, avec l'éther qu'il contient, se meut avec la vitesse h dans la direction indiquée par

la flèche. Nous supposons en même temps que m_1 est une molécule extérieure d'éther au repos, que l'angle entre la droite qui joint d et m_1 et celle de la direction de vitesse est θ, et que la distance entre la molécule m_1 et l'élément d est égale à r. La répulsion entre m et m_1 s'exprime alors, d'après le Mémoire cité, par

$$-\frac{mm_1}{r^2}\left(1 - ah\cos\theta - \tfrac{3}{4}kh^2\cos^2\theta + \tfrac{1}{2}kh^2\right),$$

et la répulsion entre l'éther condensé m_0 et m_1 sera

$$-\frac{m_0 m_1}{r^2}\left(1 - ah\cos\theta - \tfrac{3}{4}kh^2\cos^2\theta + \tfrac{1}{2}kh^2\right).$$

En employant a_0 et k_0 pour désigner de nouvelles constantes, l'attraction exercée sur m_1 par les molécules matérielles peut être exprimée par

$$+\frac{m_0 m_1}{r^2}\left(1 - a_0 h\cos\theta - \tfrac{3}{4}k_0 h^2\cos^2\theta + \tfrac{1}{2}k_0 h^2\right).$$

La somme de ces trois expressions indique l'action de la totalité de l'élément d sur la molécule d'éther m_1.

On ne sait rien d'avance sur le rapport existant entre a et a_0, ni sur celui entre k et k_0. Ces rapports ne peuvent être déterminés que par l'expérience. Il existe cependant un phénomène physique à même de les faire connaître, et ce phénomène, c'est le développement de l'électricité par le frottement. Dans ce phénomène, les molécules d'éther passent du frotteur au corps frotté ou *vice versa*. Ce passage des molécules d'un côté à l'autre ne peut guère avoir sa raison d'être que dans le fait que la répulsion exercée sur elles par le corps en mouvement a été modifiée de quelque façon par le mouvement même. Or, l'action du corps en mouvement sur une molécule d'éther qui se trouve dans le frottoir immobile est donnée par la somme des trois expressions citées ci-dessus. Si maintenant l'on

pose $\frac{a_0}{a} = \frac{k_0}{k} = \frac{m + m_0}{m_0}$, cette somme sera égale à $-\frac{mm_1}{r^2}$, ou, en d'autres termes, on obtient la même valeur pour la répulsion qu'avant que le corps fût en mouvement. Ainsi, $\frac{a_0}{a}$ et $\frac{k_0}{k}$ ne peuvent avoir exactement la même valeur pour que le frottement soit à même de produire de l'électricité.

Ce qui vient d'être dit s'applique au cas où le corps en mouvement et le frotteur sont en contact, c'est-à-dire lorsque r est infiniment petit. Si les deux corps se trouvent à une certaine distance l'un de l'autre, il est impossible de produire un développement sensible d'électricité par le mouvement de l'un des corps. Par suite, $\frac{a_0}{a}$ et $\frac{k_0}{k}$ doivent sensiblement être égaux à $\frac{m + m_0}{m_0}$ aussitôt que r a une valeur finie. Si donc on met en mouvement un corps accompagné de l'éther tant libre que condensé qu'il contient, son action, à une distance donnée sur une molécule extérieure immobile d'éther, sera à peu près aussi grande que si le corps se trouvait en repos à la même distance. Il est facile de montrer qu'il en est encore ainsi, quand la molécule extérieure d'éther est elle-même en mouvement et qu'elle forme par suite un élément d'un véritable courant galvanique. Un tube cylindrique mis en rotation autour de son axe ne devra donc pas exercer d'action électrodynamique, ou s'il le fait, cette action sera du moins insignifiante. En effet, l'action des courants dus à l'entraînement de l'éther dans la direction de la rotation est neutralisée par l'action électrodynamique opposée que produit le mouvement des molécules propres du corps dans la même direction (¹).

(¹) Lors de la déduction des formules exprimant l'action réciproque de deux éléments de courant galvaniques, tandis que les conducteurs dans lesquels se meut le fluide électrique sont en repos, nous avons admis (*Théorie des phénomènes électriques*, p. 12) que $a_0 = a$ et $k_0 = k$. On

M. Lemström a cependant réussi à montrer dans une série d'expériences très-remarquables qu'un cylindre en rotation est réellement à même de produire une action électrodynamique, mais excessivement faible. En mettant un cylindre de carton rempli d'air en rotation rapide autour d'un cylindre de fer doux, M. Lemström trouva que l'état magnétique de ce dernier était modifié par la rotation. M. Lemström a démontré qu'il est difficile d'attribuer cette modification de l'état magnétique du cylindre de fer à une autre cause qu'à l'action électrodynamique du cylindre de carton. Il continuera ces recherches si intéressantes, et si importantes surtout au point de vue théorique.

Comme il résulte suffisamment de ce qui précède, la théorie qui vient d'être formulée pour les phénomènes d'induction unipolaire ne repose pas sur des admissions vagues et arbitraires relativement aux propriétés de l'aimant et du courant galvanique; elle se base, bien au contraire, exclusivement sur les propriétés connues de ces derniers, découvertes au moyen d'expériences ou de recherches d'une autre nature. La théorie est indépendante de l'admission d'un ou de deux fluides électriques, et elle donne des résultats en pleine harmonie avec l'expérience et avec les exigences de la Théorie mécanique de la chaleur. Nous croyons donc pouvoir affirmer que cette théorie fournit la seule explication admissible et correcte des phénomènes d'induction unipolaire, qui, comme on le verra dans le paragraphe suivant, jouent un rôle des plus importants dans la nature.

---

arrive par là au même résultat qu'en admettant que le rapport entre ces constantes est égal à $\frac{m+m_0}{m_0}$, mais la déduction en devient plus simple.

§ II. — *De l'électricité atmosphérique et de l'aurore boréale.*

On sait que la terre peut être considérée comme un conducteur relativement bon de l'électricité. D'un autre côté, l'air atmosphérique est un très-mauvais conducteur à l'état sec et sous la pression à laquelle il est soumis à la surface de la terre. Sa conductibilité, qui dépend presque exclusivement de la quantité relative d'humidité qu'il contient, est, par suite, soumise à des variations incessantes au double point de vue du temps et de l'espace. Quand la densité de l'air diminue, sa conductibilité augmente, et il doit exister, en conséquence, à une hauteur considérable au-dessus de la surface terrestre, une couche d'air dont la puissance conductrice est meilleure sans être cependant particulièrement bonne. La surface terrestre tant solide que liquide est donc immédiatement entourée d'une couche d'air douée d'une faible conductibilité et soumise à des variations incessantes. A cette couche en succède une autre dont la conductibilité est plus grande et, autant que nous le savons, sensiblement invariable. La limite supérieure de l'atmosphère a été fixée, par la voie astronomique, entre 70 et 80 kilomètres. A vrai dire, ces déterminations ne signifient pas autre chose, sinon que l'atmosphère possède jusqu'à cette limite une densité suffisante pour indiquer sa présence par les méthodes de détermination ordinaires. La circonstance que l'atmosphère, même excessivement raréfiée, s'élève encore plus haut est prouvée de la manière la plus évidente par le fait que l'on a observé des étoiles filantes presque à 900 kilomètres au-dessus de la surface terrestre. Ces petits corps ne peuvent évidemment devenir brillants que parce qu'une partie de leur force vive, transformée en chaleur par le frottement de l'air, augmente leur température à un degré tel, qu'ils commencent

à briller. Or, nous ne pouvons apercevoir le corps tombant que du moment où il devient lumineux, et il est évident qu'il aura déjà parcouru à ce moment-là un certain chemin dans l'atmosphère raréfiée avant d'atteindre une si haute température. Ainsi, la limite supérieure de l'atmosphère doit se trouver à une distance de la Terre beaucoup plus grande qu'on ne l'a admis jusqu'ici.

L'action magnétique de la Terre ne peut pas s'expliquer entièrement et en détail par l'admission que sa force magnétique est due à un aimant de fer ou d'acier qui se trouve dans la Terre, et qui fait un certain angle avec l'axe de rotation. Ladite action est trop irrégulière pour qu'une telle explication soit admissible. Mais on n'en constate pas moins que l'intensité totale de la force magnétique augmente en général et d'une façon assez régulière quand on s'éloigne de l'équateur magnétique vers les pôles magnétiques. Si l'on relie les points de la surface terrestre où l'inclinaison magnétique a la même valeur, on obtient des courbes qui, sans former de véritables cercles entourant la Terre et parallèles les uns aux autres, peuvent cependant être considérées comme des cercles parallèles menés à la surface de la Terre, et ayant leurs centres sur la droite qui joint entre eux les pôles magnétiques de la Terre. Si de l'équateur on se rend continuellement dans la direction indiquée par l'aiguille de déclinaison (non dans une direction telle que l'angle de déclinaison reste invariablement le même), on obtient des méridiens magnétiques convergeant vers les pôles magnétiques; ces méridiens ne sont pas des grands cercles, mais ils ont pourtant une certaine ressemblance avec ces cercles [1]. En général et en grand, il est donc permis de considérer la Terre comme un aimant dont l'axe forme un certain angle avec l'axe de rotation terrestre. Il n'est pas besoin d'une idée plus exacte

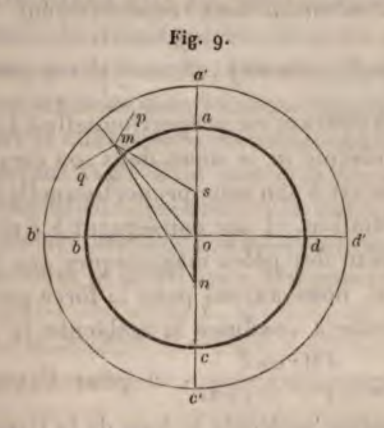
---

[1] BECQUEREL, *Traité complet du magnétisme*, p. 428, Paris, 1846.

de l'état magnétique de la Terre pour l'exposé qui va suivre.

Soit *abcd* une section passant par l'axe de rotation de la Terre, que l'on suppose constituer une sphère parfaite. *ac* est son axe de rotation, *bd* son équateur et *o* son centre. Pour simplifier la question, nous supposerons d'abord que les deux pôles magnétiques se trouvent sur l'axe de rotation, le pôle sud en *s* et le pôle nord en *n*; *abod* représen-

Fig. 9.



tera par suite l'hémisphère septentrional, et nous désignerons par *a'b'c'd'* la limite supérieure de l'atmosphère. Tandis que la Terre tourne de l'ouest à l'est autour de son axe, une molécule électrique située en *m* décrit dans la même direction un cercle parallèle à l'équateur; elle forme par conséquent un courant sur lequel agissent les deux pôles de l'aimant. Si, maintenant, on fait passer des plans par l'élément de circuit situé en *m* et par les deux pôles de l'aimant, ces plans couperont la figure le long des droites *sm* et *nm*; et si l'on mène dans ces plans les droites *mp* et *mq* respectivement perpendiculaires à *ms* et *mn*, on obtiendra les directions dans lesquelles les deux pôles magnétiques tendent à conduire la molécule électrique positive (l'éther).

Désignons par r la distance du centre de la Terre à m, par ρ la distance de chacun des pôles de l'aimant au même centre, et par l la latitude du point m. Nous ferons observer dès l'abord que les phénomènes magnétiques présentés par la Terre indiquent que ρ tout au moins ne peut pas dépasser en longueur la moitié du rayon terrestre, et nous admettons, en conséquence, que ρ est tout au plus égal à la moitié de ce rayon. Les carrés de la distance des deux pôles au point m seront donc respectivement

$$r^2 + \rho^2 - 2r\rho \sin l \quad \text{et} \quad r + \rho^2 + 2r\rho \sin l.$$

L'intensité du courant est proportionnelle à la vitesse avec laquelle la molécule m se meut dans son cercle parallèle, et cette vitesse est à son tour proportionnelle à la distance de l'axe de rotation, et par conséquent à $r \cos l$. En désignant l'intensité des pôles magnétiques par M, et par k une constante, nous aurons pour la force par laquelle le pôle sud cherche à conduire la molécule le long de mp l'expression $\frac{k\mathrm{M}r\cos l}{r^2 + \rho^2 - 2r\rho \sin l}$, et pour l'action du pôle nord sur la même molécule le long de la ligne mq

$$\frac{k\mathrm{M}r\cos l}{r^2 + \rho^2 + 2r\rho \sin l}.$$

Si l'on prend maintenant la somme des composantes de ces forces le long du rayon terrestre mené par le point m, on obtiendra

$$(\mathrm{A}) \qquad \frac{k\mathrm{M}r\rho\cos^2 l}{(r^2 + \rho^2 - 2r\rho \sin l)^{\frac{3}{2}}} + \frac{k\mathrm{M}r\rho\cos^2 l}{(r^2 + \rho^2 + 2r\rho \sin l)^{\frac{3}{2}}}.$$

Cette somme, que nous nommerons dans la suite la composante verticale, désigne la force par laquelle l'aimant cherche à conduire l'éther (le fluide électropositif) en direction verticale de bas en haut. (Si l'on veut aussi

admettre un fluide électronégatif, celui-ci sera conduit par la même force dans le sens opposé.)

Si nous considérons maintenant une molécule électrique située dans l'atmosphère ou à la surface de la Terre, pour laquelle r est en conséquence $> 2\rho$, nous voyons que la formule A sera égale à zéro au point polaire, et possédera une valeur relativement minime au voisinage de ce point. La force qui cherche à conduire la molécule électrique verticalement de bas en haut est, par conséquent, zéro au pôle, et minime à la région polaire. Il va de soi, et on le constate du reste par la formule, que cette somme est égale pour les mêmes latitudes dans les deux hémisphères.

Si l'on prend la composante de ces forces dans une direction formant un angle droit avec le rayon terrestre (la composante tangentielle), on obtient la force par laquelle les molécules électriques sont conduites le long de la tangente du cercle dont le rayon est r. On reçoit ainsi

$$\text{(B)} \qquad \frac{k\mathrm{M}r(r-\rho\sin l)\cos l}{(r^2+\rho^2-2r\rho\sin l)^{\frac{3}{2}}} - \frac{k\mathrm{M}r(r+\rho\sin l)\cos l}{(r^2+\rho^2+2r\rho\sin l)^{\frac{3}{2}}}.$$

Dans le plan équatorial, cette force devient égale à zéro. Les molécules électriques situées dans ce plan se meuvent, par suite, verticalement de bas en haut, vu que la composante de la force A est la seule qui agisse sur elles. Aux pôles terrestres ($l = 90$), B est, de même que A, égal à zéro. Les molécules situées dans les pôles mêmes ne subissent donc aucune action de l'aimant. Pour toutes les autres molécules dont la distance r au centre de la Terre est supérieure ou égale à 2ρ, le premier terme de l'expression B sera toujours positif. Pour les molécules de l'hémisphère nord (c'est-à-dire pour les valeurs positives de la latitude), le premier terme sera numériquement supérieur au second, et par conséquent toute l'expression sera positive. Pour l'hémisphère sud (c'est-à-dire pour les valeurs

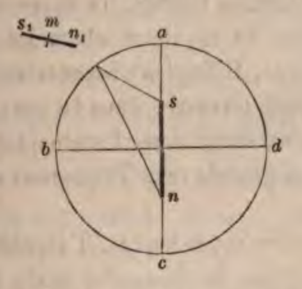
négatives de l), le premier terme sera numériquement inférieur au second, et par conséquent l'expression entière sera négative. Pour la même valeur de r, et à une latitude égale dans les deux hémisphères, l'expression B aura la même valeur numérique, mais cette valeur sera positive dans l'hémisphère nord et négative dans l'hémisphère sud. Voici donc ce qu'il résulte de l'expression B de la composante tangentielle de la force; les molécules électriques situées dans l'atmosphère terrestre ou à la surface de la terre, s'efforcent, dans l'hémisphère nord, de se rapprocher du pôle nord, et celles qui sont situées dans l'hémipshère sud, du pôle sud; la composante verticale A cherche de la même façon dans les deux hémisphères à éloigner toujours davantage les molécules du centre de la Terre dans leur marche vers lès pôles terrestres.

Nous allons voir maintenant l'influence que ces forces sont à même d'exercer sur l'état électrique de la Terre et de l'atmosphère. La couche inférieure d'air est un conducteur relativement mauvais, et nous admettons d'abord le cas idéal que sa conductibilité est partout d'égale grandeur. La composante verticale de la force magnétique en question cherche alors à conduire l'éther (l'électricité positive) de la Terre à l'air, dont les couches inférieures se chargent par suite de ce fluide, tandis que la Terre même, qui est un bon conducteur, subit un déficit d'éther (c'est-à-dire devient électronégative). La force magnétique se trouvant toujours dans une activité d'intensité égale, et la Terre tournant avec une vitesse constante, une partie du fluide électrique ne tarde pas à être conduite dans les régions supérieures de l'atmosphère, où la conductibilité est meilleure. Arrivé là, le fluide électrique est poussé vers les pôles par la composante tangentielle de la force magnétique. L'éther (l'électricité positive) s'accumule de cette façon dans l'atmosphère terrestre, tandis que la Terre même subit un déficit d'éther (devient électronégative). Cela

continue jusqu'à ce que la tension électrique de l'atmosphère soit suffisamment grande pour amener une décharge vers la Terre. Cela peut, comme c'est le cas dans les expériences ordinaires de laboratoire, s'opérer de deux façons, c'est-à-dire soit par une décharge instantanée, soit par un courant plus ou moins continu. Cette différence de décharge dépend des circonstances suivantes.

L'action d'un pôle magnétique p sur un autre pôle magnétique q s'effectue le long de la droite qui joint p et q; mais l'action du pôle magnétique p sur un élément de courant situé au même point que q s'opère, par contre, dans un plan normal à ladite droite. La composante, le long de cette droite, de l'action du pôle p sur l'élément de courant est par suite égale à zéro. Ce qui vient d'être dit peut aussi s'appliquer au cas où deux *aimants* agissent l'un sur l'autre. Si, par exemple, un aimant sn (*fig.* 10)

Fig. 10.



agit sur un autre aimant $s_1 n_1$, et que ce dernier soit mobile de manière à pouvoir prendre une position quelconque par rapport à sn, l'aimant $s_1 n_1$ se placera dans la direction de la résultante de l'action qu'exerce sur lui l'aimant sn. L'action de celui-ci sur un *élément du courant* situé au point m, ou au même endroit que $s_1 n_1$, aura lieu, par contre, dans un plan normal à la même résultante. La composante suivant cette résultante de l'action de sn sur l'élément de courant est donc égale à zéro. Si le cercle *abcd*

représente une section de la Terre, l'aimant $s_1 n_1$ indique la direction de l'aiguille d'inclinaison au point m, vu que l'on suppose $s_1 n_1$ se trouver dans la direction de la résultante de l'action que le magnétisme terrestre exerce sur lui. *L'action du magnétisme terrestre sur un élément de courant situé dans l'atmosphère a donc zéro pour composante dans la direction de l'aiguille d'inclinaison.*

Sous l'équateur, l'aiguille d'inclinaison prend une position horizontale. L'action du magnétisme terrestre sur un élément de courant situé dans l'atmosphère s'opère ici, comme le montrent les formules précitées, dans une direction verticale de bas en haut. Si donc le fluide électrique de l'atmosphère peut se précipiter verticalement dans la Terre, la force qui le produira doit être assez grande pour pouvoir surmonter, non-seulement la résistance électrique des couches d'air sous-jacentes, mais aussi l'action du magnétisme terrestre sur le fluide électrique de l'atmosphère; ou, en d'autres termes, la force mentionnée doit dépasser la somme de ces deux obstacles au mouvement du fluide électrique. Il faudra observer en outre que l'action du magnétisme terrestre dans le sens vertical sur un élément de courant situé dans l'atmosphère est, suivant la formule A, plus grande sous l'équateur qu'au sud ou au nord de ce cercle.

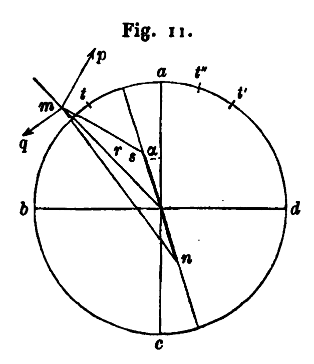
Sous les latitudes supérieures, l'aiguille d'inclinaison n'a plus une position horizontale, mais forme un angle plus ou moins grand avec le plan horizontal. Il est donc possible ici au fluide électrique de l'atmosphère de descendre dans la Terre sans que le magnétisme terrestre y mette *directement* obstacle, pourvu qu'il suive la direction de l'aiguille d'inclinaison; mais, en suivant cette direction, l'électricité a un chemin plus long à parcourir jusqu'à la surface terrestre, et subit par suite une résistance plus grande que s'il pouvait descendre verticalement. Dans le pôle magnétique, l'aiguille d'inclinaison prend une

position verticale, par suite de laquelle la résistance opposée par le magnétisme terrestre à la propagation de l'électricité dans la direction verticale est ici égale à zéro. Il suit donc de là que, *toutes les autres circonstances égales, la résistance à l'écoulement du fluide électrique de l'atmosphère à la surface de la Terre est plus grande sous l'équateur et dans les régions équatoriales qu'à une certaine distance de ce cercle, et que cette résistance diminue avec l'accroissement de l'inclinaison magnétique de la Terre.*

C'est là qu'il faut chercher, selon moi, la cause principale du fait que, dans les régions équatoriales, le fluide électrique de l'atmosphère descend à la Terre par de fortes décharges disruptives, et sous les hautes latitudes principalement, par des écoulements lents et faibles formant des courants électriques plus ou moins continus. Si l'on continue à charger, avec des électricités contraires, deux corps isolés se trouvant à une distance convenable l'un de l'autre, l'électricité finit par traverser l'espace intermédiaire en produisant des étincelles, et les deux corps se déchargent. Pour que la décharge opérée de cette façon soit forte et instantanée, il faut que les corps soient de bons conducteurs et que la résistance électrique de l'espace intermédiaire soit grande. Si cette résistance est insignifiante, la décharge commence tandis que la charge est encore faible. A mesure que la résistance s'affaiblit, la décharge prend de plus en plus la forme d'un courant continu. Dans les régions équatoriales, ou, en général, sous les latitudes inférieures, la force de l'induction magnétique terrestre agit très-intensément en rendant l'atmosphère électropositive, et la résistance à une décharge est aussi très-grande, d'après ce qui vient d'être dit. Quand la vapeur d'eau de l'air se condense en formant un nuage, celui-ci se charge du fluide électrique qui se trouvait accumulé dans l'air au même endroit. Le nuage, qui est un

n'amènent toutefois que des modifications peu essentielles dans ce qui vient d'être dit. Le cercle *abcd* (*fig.* 11) représente une section de la Terre passant par l'axe de rotation et par la droite qui réunit les pôles magnétiques. Cette

Fig. 11.



droite fait avec l'axe l'angle α (d'environ 17 degrés). La distance des pôles magnétiques à l'axe sera donc $\rho \sin \alpha$, expression dans laquelle, comme il a déjà été dit, ρ ne peut dépasser la moitié du rayon terrestre.

Nous supposerons maintenant un autre plan passant par l'axe, et formant l'angle ν avec le plan précédent, et nous considérerons l'action des pôles magnétiques sur une molécule électrique m située dans ce plan. Pendant la rotation de la Terre, les pôles magnétiques décrivent des cercles dont le rayon est $\rho \sin \alpha$. Le rayon du cercle décrit dans le même temps par la molécule m sera $r \cos l$, r désignant la distance de la molécule au centre de la Terre, et l sa latitude. La vitesse relative de la molécule m par rapport au pôle magnétique s sera obtenue, d'après ce qui précède, en donnant la même vitesse à m et à s, mais en sens inverse à la vitesse déjà existante du pôle magnétique. Si l'on prend pour unité le temps de rotation de la Terre, cette vitesse sera désignée par $2\pi\rho \sin \alpha$. Le pôle magnétique entrera par là au repos, et la molécule m se mouvra

avec la vitesse

$$2\pi\sqrt{r^2\cos^2 l + \rho^2\sin^2\alpha - 2r\rho\cos l\sin\alpha\cos v}.$$

La vitesse relative de la molécule par rapport à l'autre pôle magnétique sera

$$2\pi\sqrt{r^2\cos^2 l + \rho^2\sin^2\alpha + 2\rho r\cos l\sin\alpha\cos v}.$$

Or, ces racines carrées désignent, comme il est facile de le voir, la distance de la molécule m à la droite menée par chaque pôle parallèlement à l'axe de rotation de la Terre. Il suit donc de là que le pôle magnétique agit sur une molécule électrique de la même façon que si ce pôle était au repos et que la molécule fût en rotation autour de la droite menée par le pôle magnétique parallèlement avec l'axe terrestre. Les carrés des distances entre la molécule m et les pôles magnétiques seront respectivement

$$r^2 + \rho^2 - 2r\rho(\cos l\sin\alpha\cos v + \sin l\cos\alpha)$$

et

$$r^2 + \rho^2 + 2r\rho(\cos l\sin\alpha\cos v + \sin l\cos\alpha).$$

Les forces par lesquelles les pôles magnétiques s et n agissent sur la molécule s'expriment donc par

$$\frac{kM\sqrt{r^2\cos^2 l + \rho^2\sin^2\alpha - 2r\rho\cos l\sin\alpha\cos v}}{r^2 + \rho^2 + 2r\rho(\cos l\sin\alpha\cos v + \sin l\cos\alpha)}$$

et

$$\frac{kM\sqrt{r^2\cos^2 l + \rho^2\sin^2\alpha + 2r\rho\cos l\sin\alpha\cos v}}{r^2 + \rho^2 - 2r\rho(\cos l\sin\alpha\cos v + \sin l\cos\alpha)}.$$

La première de ces forces agit dans le plan qui passe par la molécule m et par la droite menée par le pôle magnétique s parallèlement à l'axe de la Terre, et la dernière dans le plan qui passe par m et par la droite menée parallèlement au même axe par le pôle magnétique n. Pour le but proposé, il suffira de chercher l'expression des composantes de ces forces dans les cas où v est égal à 90 degrés et à

zéro. Il résultera de ce calcul que la molécule électrique est éloignée du centre de la Terre et conduite des latitudes inférieures vers des latitudes supérieures, qu'elle soit située dans le plan représenté par la *fig.* 11 ou dans un plan qui forme avec lui un angle droit. Comme cela doit évidemment avoir lieu dans quelque plan que la molécule électrique soit située, on obtient donc pour résultat que les molécules électriques sont poussées verticalement de bas en haut, et à la même fois de latitudes inférieures vers des latitudes supérieures. Pour les plus hautes latitudes, où le $\cos l$ est minime, les deux forces, comme aussi leurs composantes dans le sens horizontal et dans le sens vertical, deviennent très-petites. La densité électrique de l'atmosphère polaire ne peut donc être grande. Ainsi, quoique les pôles magnétiques aient une position excentrique, les régions supérieures de l'atmosphère, d'où le fluide électrique se précipite sur la Terre en formant des courants continus, doivent décrire une ceinture annulaire fermée autour du pôle. Mais, ainsi que nous allons le démontrer, cette ceinture ne se ferme pas autour du pôle astronomique comme son centre.

Nous supposons la molécule m située dans le plan qui passe par l'axe terrestre et par la ligne qui joint les pôles de l'aimant. En rendant $\nu = 0$ dans les formules précédentes, on obtient les expressions suivantes pour les deux forces :

$$\frac{kM(r\cos l - \rho\sin\alpha)}{r^2 + \rho^2 - 2r\rho\sin(l+\alpha)} \quad \text{et} \quad \frac{kM(r\cos l + \rho\sin\alpha)}{r^2 + \rho^2 + 2r\rho\sin(l+\alpha)}.$$

Ces forces agissent toutes deux dans le plan en question, l'une le long de mp et l'autre le long de mq (*fig.* 11). Les cosinus des angles formés par elles avec le rayon terrestre seront

$$\frac{\rho\cos(l+\alpha)}{\sqrt{r^2 + \rho^2 - 2r\rho\sin(l+\alpha)}} \quad \text{et} \quad \frac{\rho\cos(l+\alpha)}{\sqrt{r^2 + \rho^2 + 2r\rho\sin(l+\alpha)}}.$$

La somme des forces verticales sera donc

$$(C)\quad \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{kM\,(r\cos l - \rho \sin\alpha)\,\rho\cos(l+\alpha)}{[r^2+\rho^2-2r\rho\sin(l+\alpha)]^{\frac{3}{2}}} \\ + \dfrac{kM\,(r\cos l + \rho \sin\alpha)\,\rho\cos(l+\alpha)}{[r^2+\rho^2+2r\rho\sin(l+\alpha)]^{\frac{3}{2}}}. \end{array} \right.$$

La somme des forces tangentielles sera par contre

$$(D)\quad \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{kM\,(r\cos l - \rho \sin\alpha)[r-\rho\sin(l+\alpha)]}{[r^2+\rho^2-2r\rho\sin(l+\alpha)]^{\frac{3}{2}}} \\ - \dfrac{kM\,(r\cos l + \rho \sin\alpha)[r+\rho\sin(l+\alpha)]}{[r^2+\rho^2+2r\rho\sin(l+\alpha)^{\frac{3}{2}}}. \end{array} \right.$$

Si l'on fait entrer dans la formule (C) $l = 90^\circ - \alpha$, soit la latitude du pôle magnétique, la somme des forces verticales sera égale à zéro. Les molécules électriques qui se trouvent dans l'atmosphère verticalement au-dessus des pôles magnétiques ne sont donc pas soulevées dans la direction verticale par l'aimant terrestre.

Au voisinage du pôle magnétique, les composantes verticales et tangentielles de la force d'induction sont très-petites, et par suite *l'électricité de l'air y doit être minime, tout comme elle l'était autour du pôle astronomique quand nous supposions la coïncidence des deux axes*. Si l'on fait entrer dans la formule (D) la même valeur de l, cette formule prend une valeur positive, ou, en d'autres termes, la composante tangentielle cherche à y rapprocher les molécules électriques de l'axe de rotation de la Terre. En introduisant au contraire $l = 90^\circ$ dans la même formule, celle-ci prend une valeur négative, ce qui signifie que la composante de force tangentielle pousse vers le pôle magnétique les molécules électriques qui se trouvent dans l'atmosphère au-dessus du pôle astrono-

mique. C'est donc entre ces deux points que doit se trouver celui auquel la force tangentielle est égale à zéro. Tandis que la composante verticale de la force d'induction de la Terre diminue, en général, avec l'accroissement de la latitude, la tension électrique des couches supérieures de l'atmosphère augmente par contre avec celle-ci jusqu'à ce que la tension devienne suffisamment forte pour provoquer l'écoulement du fluide électrique dans la Terre. L'espace annulaire de l'atmosphère où le fluide électrique descend sur la Terre se ferme évidemment autour du pôle magnétique. Cet espace est caractérisé par la circonstance que la composante verticale de la force d'induction de la Terre a la même grandeur dans chacun de ces points. La formule (C) donne une idée de la situation.

Comme on l'a vu plus haut, le fluide électrique s'écoule dudit espace à la Terre dans la direction de l'aiguille d'inclinaison du magnétisme terrestre. Ce sont ces courants électriques de l'air raréfié qui produisent l'aurore boréale. Il est évident que ce phénomène doit principalement se montrer au voisinage de l'espace annulaire en question. D'après les recherches de M. Loomis, la plupart des aurores boréales apparaissent dans l'Amérique du Nord entre 50 degrés et 62 degrés de latitude, après quoi leur fréquence diminue à des latitudes encore plus élevées. La ligne centrale de l'espace en question se trouve en conséquence à 56 degrés de latitude, c'est-à-dire à 34 degrés du pôle astronomique et à 17 degrés du pôle magnétique. Cette ligne centrale est marquée par le point t dans la *fig.* 11. Maintenant, il s'agit d'examiner sous quel degré de latitude l'espace annulaire doit se trouver à 180 degrés de longitude de là, ou, en d'autres termes, entre quels degrés de latitude les aurores boréales doivent être le plus fréquentes en Europe et en Asie.

Si l'on rend dans la formule (C) $l = 90° - 34° = 56°$,

on aura

$$(E)\quad \left\{ \begin{aligned} &\frac{kM(r\sin 34 - \rho\sin 17)\rho\sin 17}{(r^2+\rho^2-2r\rho\cos 17)^{\frac{3}{2}}} \\ &+\frac{kM(r\sin 34 + \rho\sin 17)\rho\sin 17}{(r^2+\rho^2+2r\rho\cos 17)^{\frac{3}{2}}}. \end{aligned} \right.$$

Cette expression désigne l'intensité de la composante verticale de la force d'induction dans l'Amérique du Nord, sous le 56ᵉ degré de latitude.

Si l'on rend dans la formule (C) $l = 90^\circ$, on aura l'expression de la même composante dans le pôle astronomique, savoir

$$(F)\quad + \frac{kM\rho^2\sin^2 17}{(r^2+\rho^2-2r\rho\cos 17)^{\frac{3}{2}}} - \frac{kM\rho^2\sin^2 17}{(r^2+\rho^2+2r\rho\cos 17)^{\frac{3}{2}}}.$$

On entend par r la distance du centre de la Terre à la molécule électrique considérée, située dans l'atmosphère; ρ étant, comme on l'a déjà fait observer, inférieur à la moitié du rayon terrestre, il est par conséquent aussi inférieur à $\frac{1}{2}r$. Eu égard à cette circonstance, la formule (E) reçoit une plus grande valeur numérique que (F). Il suit donc de là que la composante verticale de la force d'induction est plus petite au pôle astronomique qu'au point pour lequel la formule (E) est valable. Si, dans la formule (C), on fait $l = 90 + 34$, on obtient la force cherchée pour un point t' se trouvant à 56 degrés de latitude comptée de d. La formule (C) se transforme de la sorte dans la formule suivante :

$$(G)\quad \left\{ \begin{aligned} &\frac{kM(r\sin 34^\circ + \rho\sin 17)\rho\sin 51^\circ}{(r^2+\rho^2-2r\rho\cos 51^\circ)^{\frac{3}{2}}} \\ &+\frac{kM(r\sin 34^\circ - \rho\sin 17)\rho\sin 51^\circ}{(r^2+\rho^2+2r\rho\cos 51^\circ)^{\frac{3}{2}}}. \end{aligned} \right.$$

La formule (G) ayant une plus grande valeur numérique que la formule (E), le point auquel la composante verticale de la force d'induction sera la même qu'au point t, devra donc se trouver sous une latitude supérieure à t'. Il suit donc de là que la zone annulaire précitée coupera le plan en question à un point t'' situé entre le pôle astronomique et t'. Ainsi, la zone présentant la plus grande fréquence d'aurores boréales devra se trouver à une plus haute latitude en Europe et en Asie que dans l'Amérique du Nord.

Les propriétés magnétiques de la Terre ne pouvant complétement s'expliquer par l'admission de l'existence d'un aimant dans son intérieur, il est de toute évidence que la considération qui précède ne peut indiquer que la marche générale des phénomènes dont il est ici question. Nous allons maintenant examiner rapidement si les résultats de cette considération sont conformes à ceux qu'ont donnés les observations.

L'électricité atmosphérique a longtemps été l'objet de recherches répétées. Rendre compte de ces nombreuses recherches exigerait trop de place, et c'est, du reste, d'autant moins nécessaire que nous possédons déjà un relevé, suivi d'une discussion critique très-bien faite, de ces observations (¹). Quelques savants ont essayé d'expliquer les résultats d'observations obtenus en admettant que l'air même est électropositif à l'état normal, tandis que d'autres ont pensé que la surface de la Terre est électronégative et qu'elle produit par l'induction les phénomènes électriques observés dans l'atmosphère. Les opinions ont été très-partagées sur la véritable cause de l'état électrique de l'air ou de celui de la surface terrestre. Certains ont admis que l'évaporation de la mer, des lacs et de la surface ter-

(¹) *Om den s. k. Luftelektriciteten* (*Sur l'électricité atmosphérique*), par H.-E. Hamberg. Upsala, 1872.

restre humide rend l'atmosphère électropositive et la Terre électronégative; d'autres, par contre, que la répartition de l'électricité a sa cause effective dans la végétation, dans la putréfaction des matières organiques à la surface de la Terre, dans le frottement de l'air contre la surface terrestre solide ou liquide, ou dans la densification et la raréfaction de l'air, etc. Des recherches plus exactes ayant montré qu'aucune de ces opinions ne peut être correcte, on a attribué à ce phénomène une cause purement cosmique, ayant son siége dans l'espace vide entourant la Terre, ou chez d'autres corps célestes, principalement le Soleil. En un mot, on n'a pas réussi jusqu'à cette heure à donner, soit par suite d'observations, soit par des considérations théoriques, une cause valable et sûre aux phénomènes électriques de l'atmosphère terrestre. Il résulte cependant des observations mentionnées que l'atmosphère peut être, dans des conditions normales, considérée comme électropositive dans ses couches inférieures accessibles aux observations, que la quantité d'électricité augmente avec la hauteur au-dessus de la surface terrestre, et que cette quantité est soumise à une variation diurne et à une variation annuelle.

L'exposé qui précède de la cause de l'induction unipolaire a donné pour résultat que l'atmosphère doit être électropositive et la Terre électronégative. Les molécules électriques qui se trouvent à la surface de la Terre ou audessous sont conduites, par la force d'induction unipolaire terrestre, dans l'atmosphère, où elles s'accumulent jusqu'à atteindre une certaine densité, dépendant de la plus ou moins grande conductibilité des couches d'air. Ce n'est que successivement que, poussées par la même force, elles arrivent dans les couches supérieures de l'atmosphère douées d'une conductibilité très-grande, mais certainement moindre que celle des métaux. En même temps que les molécules électriques s'élèvent au-dessus de la surface ter-

restre, elles sont transportées, dans les deux hémisphères, des latitudes inférieures vers les latitudes supérieures, où la densité électrique va, en conséquence, toujours en augmentant. Les forces tendant à conduire les molécules électriques dans le sens vertical et horizontal sont très-faibles au-dessus et autour des pôles magnétiques, et, par suite, la densité électrique des couches supérieures de l'atmosphère atteint un maximum de valeur à une certaine distance de ces pôles. Comme nous l'avons vu, ce maximum de densité électrique forme une ceinture enfermant dans l'hémisphère nord tant le pôle magnétique que le pôle astronomique, et il en est sans doute de même dans l'hémisphère sud. Les forces magnétiques agissent avec une intensité toujours égale, les variations relativement minimes subies d'une époque à une autre par l'aimant terrestre pouvant être laissées de côté. Si maintenant la conductibilité de l'air était également invariable, la tension électrique des couches inférieures de l'atmosphère resterait toujours la même. Mais, comme cette condition n'est nullement remplie, la tension en question doit nécessairement varier. Il est évident que la tension électrique à un point donné auprès de la surface terrestre ne dépend pas seulement de la conductibilité de l'air entourant ce point, mais aussi de celle des couches d'air supérieures jusqu'à la hauteur où cette conductibilité devient suffisamment bonne par suite de la raréfaction de l'air. Supposons, par exemple, qu'un brouillard entoure la surface terrestre et qu'au-dessus de ce brouillard se trouve une couche d'air sec impénétrable à l'électricité. La force d'induction magnétique toujours active conduira alors les molécules électriques de la Terre dans le brouillard, lequel se montrera bientôt électropositif, ainsi que les observations l'ont prouvé. Si, par contre, le brouillard s'étendait jusqu'aux couches supérieures conductrices de l'air, la charge électrique des couches inférieures disparaîtrait sans doute subitement. On

voit, par ce qui vient d'être dit, combien il est hasardeux de vouloir attribuer la charge électrique plus ou moins grande de l'air à un lieu donné, à l'humidité de l'air plus ou moins grande observée à ce même lieu. Il est fort probable, selon nous, que les variations périodiques, tant diurnes qu'annuelles, de l'état électrique des couches inférieures de l'atmosphère, ont leur cause dans les variations de la conductibilité de l'atmosphère; mais il ne suffit certainement pas de prendre en considération les seules variations qui surviennent sur le point où se font les observations de l'électricité atmosphérique.

L'état électrique de l'air dans les régions polaires offre un intérêt tout spécial. Il fut impossible à Scoresby, malgré ses tentatives réitérées, de découvrir dans ces régions la moindre trace d'électricité dans l'air ([1]). L'expédition française de la corvette *la Recherche*, qui passa l'hiver de 1838-1839 à Bossekop, dans l'Altenfjord (environ sous le 70e degré lat. N.), se livra à plusieurs reprises à l'étude de l'électricité de l'air. MM. Lottin et Bravais, qui firent pendant l'été des expériences de cette nature à des latitudes inférieures, obtinrent des déviations positives sur un électroscope à brins de paille, quand celui-ci se trouvait en communication métallique avec des flèches lancées dans l'air. Or, ces déviations cessèrent dès qu'ils furent parvenus à la latitude du cap Nord. En février et en mars, cependant, ils réussirent plusieurs fois à saisir de faibles traces d'électricité positive dans l'air, en mettant l'électroscope en communication avec des cerfs-volants qu'ils faisaient monter à une hauteur considérable ([2]). Pendant l'expédition suédoise de 1868 au Spitzberg, M. Lemström essaya vainement de découvrir des traces de l'électricité de l'air

---

([1]) *An account of the arctic regions*, vol. I, p. 382. Edinburgh, 1820.

([2]) *Voyage en Scandinavie et en Laponie : Magnétisme terrestre*, t. III. — Communications verbales de M. Siljeström, qui prit part à cette expédition.

(80 degrés lat. N.) ([1]). M. Wijkander eut plus de chance dans l'expédition de 1872-1873 aux mêmes régions. Muni d'un appareil plus sensible que ceux employés par ses prédécesseurs, il obtint continuellement, dans l'automne de 1872, des preuves d'électricité positive dans l'air. Pendant l'hiver, du milieu de janvier vers la fin de mai, l'électricité de l'air se montra, par contre, tantôt positive, tantôt négative. Il obtint en effet environ vingt observations positives et un nombre à peu près égal d'observations négatives. Les observations qui furent faites dans le cours du printemps, lorsque la température se rapprochait de zéro, donnèrent les mêmes résultats que les observations d'été, savoir de faibles traces d'électricité positive. Un fait remarquable, en outre, c'est que l'air était généralement positif pendant les jours d'hiver où les aurores boréales apparaissaient, mais à d'autres occasions le plus souvent négatif. M. Wijkander fait à cet égard la remarque suivante, qui selon moi mérite bien d'être prise en considération : toutes les observations qui ont été faites concordent en ceci que, sous les latitudes en question, et aux températures plus hautes, l'air conduit l'électricité avec une facilité très-grande, circonstance à laquelle on a attribué l'absence du tonnerre et de la présence de l'aurore boréale. Divers savants ont cru pouvoir admettre que cela dépendait de l'humidité de l'air dans ces régions, *mais la circonstance que d'autres causes y contribuent aussi est prouvée par le fait que la même température et la même humidité n'exercent pas cette action à un si haut degré sous des latitudes inférieures* ([2]).

Ces observations prouvent indubitablement que la cause à laquelle on doit l'électricité positive de l'air dans ces régions est très-faible. Cette cause ne peut être attribuée,

---

([1]) *Bulletin* (Öfversigt) *des travaux de l'Académie des Sciences* pour 1869.
([2]) *Bulletin* (Öfversigt) *des travaux de l'Académie des Sciences* pour 1874.

selon moi, à l'humidité de l'air, et, par suite, à la conductibilité de celui-ci. Si c'était le cas, le brouillard ne devrait trahir, dans les latitudes inférieures, que des traces insignifiantes d'électricité, puisque la conductibilité du brouillard est assurément aussi bonne que celle de l'air des régions polaires dans les circonstances ordinaires. Or, comme on le sait, malgré sa grande conductibilité, le brouillard est très-fortement électropositif.

La cause réelle des résultats précités d'observation, c'est, selon moi, que la composante verticale de la force d'induction est très-minime, d'après ce qui vient d'être dit, ou, en d'autres termes, que la force tendant à conduire l'éther (le fluide électropositif) de la Terre à l'air est très-insignifiante. La charge électropositive de l'air doit donc être faible et parfois même si minime, que l'air devient négatif par la communication avec la Terre, comme le montrent les observations de M. Wijkander. La Terre elle-même doit par contre, être toujours électronégative dans ces régions. Si aucune force extérieure n'agissait sur le fluide électrique, la Terre et l'atmosphère se trouveraient à l'état neutre. Mais, comme une partie du fluide électropositif qui a appartenu à la Terre a été transporté dans l'atmosphère par suite de l'action de la force d'induction, il faut que la Terre elle-même soit électronégative. La Terre étant un bon conducteur de l'électricité et constituant en même temps un sphéroïde, son électricité négative doit se répartir d'une façon assez égale à sa surface. Par suite, la surface terrestre doit également se montrer électronégative aux régions polaires, quoique la composante verticale de la force d'induction y soit très-faible. Sauf quelques rares occasions où il lui fut difficile ou impossible de constater des traces d'électricité, M. Wijkander trouva aussi que la Terre était *constamment* électronégative. Il suit aussi de la théorie proposée que la conductibilité de l'air dans les régions polaires doit, comme le signale M. Wijkander, paraître plus

grande qu'à des latitudes inférieures pour la même température et la même humidité. Si un corps conducteur placé dans l'atmosphère est chargé d'électricité, celle-ci doit évidemment être influencée par le voisinage d'un corps électronégatif aussi grand que la Terre. Si le corps conducteur est chargé d'électricité positive, cette électricité est attirée de haut en bas par la Terre négative; si la charge est négative, c'est l'inverse qui a lieu pour les mêmes raisons. Dans les deux cas, par conséquent, la déperdition de l'électricité dans l'air est accélérée par le fait que la Terre négative se trouve au voisinage du corps chargé. Or, la force d'induction de la Terre agit sur l'électricité du corps dans la direction inverse. Si le corps est électropositif, cette force tend à conduire l'électricité du corps de bas en haut, et *vice versâ* si le corps est électronégatif. La force d'induction de la Terre tend donc à diminuer l'influence de l'électricité de la Terre sur la charge du corps. Dans les régions de la surface terrestre où la force d'induction est ou zéro ou minime, le corps perdra, par suite, plus promptement sa charge électrique que dans les localités où cette force est plus grande. La conductibilité de l'air humide devra donc *paraître* plus grande dans les régions polaires qu'à des latitudes inférieures. La composition de l'air pur est sans nul doute la même dans la zone froide que dans la zone tempérée. A la même température et sous la même pression, elle devra, dans ces deux régions, contenir, à l'état saturé, la même quantité de vapeur d'eau, et il est impossible de trouver des raisons pour lesquelles sa conductibilité électrique dût être différente. C'est donc à des causes extérieures qu'il faut attribuer, dans les régions polaires, la déperdition rapide de la charge des corps électrisés, et ces causes extérieures sont probablement celles qui viennent d'être indiquées.

D'après la théorie proposée, il se comprend de soi-même, et sans autre explication, que l'air devait, comme le con-

statent les observations de M. Wijkander, montrer des traces d'électricité positive les jours qui se distinguaient par des aurores boréales intenses.

La cause qui vient d'être donnée de l'état électrique de l'atmosphère est probablement la seule qui agisse partout et sans interruption. Mais il en existe sans nul doute quelques autres encore dont l'action, liée à certaines localités, est d'une nature plus accidentelle. A ces causes appartient, par exemple, le développement d'électricité signalé par M. K.-A. Holmgren, lequel a trouvé que, par la division d'un liquide en gouttes, une force électromotrice naît au point même où s'opère cette division (1). On doit probablement à la même force l'électricité négative de la bruine fine emportée par l'air dans les cascades ou cataractes puissantes. Quant à l'évaporation, à la végétation, au frottement des molécules d'air l'une contre l'autre ou contre la surface de la Terre, de même qu'à plusieurs autres phénomènes dans lesquels on a voulu trouver la cause de l'électricité de l'air, ils n'ont, par contre, à coup sûr, aucune influence sensible sur le phénomène en question (2).

---

(1) *Om elektriciteten som kosmisk kraft* (De l'électricité comme force cosmique), par K.-A. Holmgren, *Mémoires de l'Académie des Sciences*, t. XI (1872).

(2) De toutes ces causes prétendues de l'électricité de l'air et de l'aurore boréale, l'évaporation est sans doute celle qui a fixé le plus l'attention. Mais des raisons multiples peuvent être citées pour l'opinion que l'évaporation n'a rien à voir dans ce phénomène. On peut faire observer en premier lieu que par des expériences faites au laboratoire on n'a jamais réussi à prouver définitivement que l'évaporation produit de l'électricité. Ainsi cette opinion ne se fonde pas sur une base expérimentale solide. En outre, d'après cette opinion, l'électricité de l'air devrait être plus forte en été qu'en hiver, vu que l'évaporation est plus grande dans la première saison que dans la seconde. Or, comme personne ne l'ignore, c'est précisément le contraire qui a lieu. L'électricité positive produite par l'évaporation, principalement sous la zone torride, s'élèverait dans l'atmosphère avec la vapeur d'eau ascendante, serait ensuite conduite par les courants d'air supérieurs contre-alizés vers des latitudes plus élevées, où elle formerait l'aurore boréale par sa descente à la terre. Mais ces courants se

Il va sans dire que, si quelques nuages dans l'atmosphère terrestre ont été, de la manière indiquée, chargés d'électricité positive, d'autres nuages peuvent à leur tour s'électriser négativement par influence.

Comme il a été dit ci-dessus (p. 82), le fluide électropositif (l'éther) s'écoule des couches atmosphériques supérieures à la Terre dans la direction de l'aiguille d'inclinaison. La composante verticale de la force d'induction diminue, en général, à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur vers le pôle, tandis que la densité du fluide électrique qui se trouve dans l'atmosphère augmente avec la latitude. Quand on s'est assez rapproché du pôle pour que cette composante et la résistance électrique de l'air ne puissent plus y opposer un obstacle suffisant, le fluide positif s'écoule dans la terre électronégative. Les endroits où s'opère cet écoulement forment une zone continue, enfermant dans l'hémisphère nord tant le pôle magnétique que le pôle astronomique, et descendant en Amérique à des latitudes plus basses que dans l'ancien monde. C'est, selon moi, à la

---

trouvent à une distance insignifiante du sol en comparaison de la hauteur des aurores boréales, et ils descendent en outre à la surface terrestre longtemps avant de parvenir aux régions distinguées par la principale fréquence de ces phénomènes. Quoique l'on ne puisse pas accorder toute confiance aux mesures de la hauteur de l'aurore boréale, on sait pourtant avec sûreté que cette hauteur est parfois très-considérable. Quelques déterminations faites pendant l'expédition française mentionnée ci-dessus indiquèrent une hauteur de 150 kilomètres, que l'on a trouvée plus considérable encore en d'autres occasions. (Sous les latitudes les plus élevées, cependant, l'aurore boréale peut se montrer de temps à autre à une faible distance de la surface terrestre, comme le prouvent les observations de Farquharson, Wrangel, Parry, Lemström et plusieurs autres voyageurs arctiques.) A une hauteur si élevée, l'air extrêmement raréfié n'est assurément pas gêné par des vents, et il est difficile de comprendre comment cet air raréfié pourrait devenir électrique par l'évaporation qui se produit dans les régions équatoriales. S'il n'existait aucune force spéciale pour faire monter le fluide électropositif dans l'atmosphère, ce fluide devrait aussitôt descendre à la terre, et l'atmosphère ne montrerait certainement pas de traces d'électricit

marche de ces courants à travers l'air raréfié qu'il faut attribuer la naissance de l'aurore boréale ([1]).

Il est donc évident que les aurores boréales doivent devenir plus nombreuses à mesure que du sud l'on s'approche de cet anneau, et que leur principale fréquence doit être sous cet anneau même, tandis qu'elles recommencent à décroître en nombre et en éclat sous des latitudes encore plus élevées. Si l'on se trouve au sud de l'anneau, on aperçoit l'aurore boréale au nord ; si l'on se trouve au-dessous, elle occupe, quand on la voit dans des circonstances favorables, la majeure partie du ciel, et si, enfin, on se trouve au nord de l'anneau, l'aurore boréale se présente au sud. On ne peut guère admettre que cet anneau occupe une position absolument fixe dans l'atmosphère ; il est plutôt probable

---

([1]) M. Lemström a fait sur la marche des courants électriques à travers l'air quelques expériences qui jettent une grande lumière sur le phénomène en question (*Archives des Sciences phys. et nat.*, t. LXIV, p. 72 et 162). A l'aide d'une machine de Holtz, M. Lemström tenait à une charge électrique déterminée une boule de métal munie de quelques pointes métalliques. Dans ce but, la boule était reliée par un fil conducteur à l'un des pôles de la machine, tandis que l'autre pôle se trouvait en communication avec la terre. A une certaine distance de la boule, quelques tubes de Geissler furent fixés à un échafaudage isolé permettant de les approcher ou de les éloigner de la boule. Les tubes étaient, de la façon ordinaire, munis à leurs extrémités de minces fils de platine. Les extrémités postérieures étaient reliées avec la terre par un fil conducteur, tandis que les extrémités antérieures, ou celles tournées vers la boule, se trouvaient isolées dans l'air. Quoique aucune communication métallique n'eût lieu entre les tubes et la boule, ceux-ci commençaient cependant à briller dès que l'on mettait la machine en mouvement, et cela même quand la distance entre les tubes et la boule s'élevait à 2 mètres. Le courant qui produisait le phénomène lumineux devait donc traverser, sur une longueur de 2 mètres, une couche d'air de densité ordinaire. Il est natu- qu'il ne se produisait aucun phénomène lumineux dans cette couche ir dense. Ces expériences me paraissent avoir beaucoup d'analogie avec phénomènes qui se produisent sur une grande échelle à la formation l'aurore boréale dans l'atmosphère terrestre. Les courants électriques ant des couches supérieures de l'atmosphère descendent dans la Terre s produire de phénomènes lumineux dans les couches les plus basses de l'atmosphère.

que dans telle occasion il se trouve plus au sud ou plus au nord que dans telle autre, circonstance qui peut dépendre des modifications de la conductibilité électrique de l'atmosphère terrestre. Si l'on se trouve à un point de la surface terrestre au-dessus duquel l'anneau est ordinairement situé, on peut donc voir l'aurore boréale tantôt au nord, tantôt au sud. Si cet anneau formait un cercle véritable avec le pôle magnétique pour centre, si l'intensité du courant descendant était la même sur chaque point, et qu'elle produisît par conséquent partout la même intensité de lumière, un observateur se trouvant sur la Terre au sud de l'anneau devrait nécessairement voir le sommet de l'arc boréal dans le plan passant par le lieu d'observation, le centre de la Terre et le pôle magnétique. Si, maintenant, l'aiguille de déclinaison se plaçait entièrement dans ce plan, on apercevrait, par suite, toujours le sommet de l'arc boréal dans le plan de déclinaison magnétique terrestre. Mais l'anneau en question ne forme pas de cercle complet, et l'on ne peut admettre non plus que les courants descendants aient partout la même intensité de lumière. En outre, le plan en question n'indique qu'approximativement la direction de l'aiguille de déclinaison. Il suit donc de la théorie que la direction de l'aiguille de déclinaison doit indiquer en général et approximativement le sommet de l'arc boréal, sans que l'on soit autorisé à prétendre qu'ils doivent entièrement coïncider entre eux.

Dans les localités de la surface terrestre situées sous l'anneau du maximum de densité électrique, l'électricité descend dans la direction indiquée par l'aiguille d'inclinaison de la localité, car, comme on l'a démontré plus haut (p. 82), l'action de la force inductrice de la Terre est égale à zéro dans cette direction.

Les courants descendants ne peuvent être forcés à dévier de la direction susdite que si, par suite d'un état météorologique accidentel de l'atmosphère, la résistance électrique

de l'air est plus grande dans cette direction que dans une autre, cas dans lequel l'intensité du courant descendant sera le plus considérable dans la direction minima de résistance. Comme un cas de cette nature peut facilement se présenter, on est seulement autorisé à prétendre, sur la base de la théorie, que les courants descendants doivent être, *en général*, parallèles à l'aiguille d'inclinaison. Or, le courant trahit son chemin à travers l'air par un rayon lumineux. Si l'on regarde, depuis la surface de la Terre, ces rayons lumineux parallèles les uns aux autres, ils doivent paraître converger en un point unique, par les mêmes raisons de perspective auxquelles on doit la convergence visuelle des rangées d'arbres d'une longue allée. Quant à ce point, il devra donc se trouver dans la direction que l'aiguille d'inclinaison du lieu d'observation indique sur le firmament. C'est à ce phénomène d'Optique que l'on doit la couronne aurorale qui se montre dans les aurores boréales complètes. Les courants en question se forment dès que la différence de tension électrique entre l'atmosphère et la Terre est assez grande pour surmonter l'obstacle dû à la résistance électrique de l'air. Or, la Terre étant un bon conducteur électrique et constituant en outre une sphère, sa charge négative doit être à peu près la même partout. On ne prétendra pas, sans doute, que la charge positive de l'air dans l'hémisphère méridional soit constamment égale à cette même charge dans l'hémisphère septentrional. Les forces qui tendent à rendre l'air électropositif et la Terre électronégative sont égales dans les deux hémisphères, mais le résultat de l'activité de ces forces dépend en partie de l'état météorologique de l'air, qui peut être différent pour chaque hémisphère. Comme on vient de le dire, cependant, il ne peut y avoir une grande différence dans la charge négative de la Terre, et, par suite, l'une au moins des causes dont dépend la décharge est commune aux deux hémisphères. Par suite, on ne peut trouver rien de bien extraordinaire au fait

que les aurores boréales sont souvent simultanées dans les deux hémisphères.

Si nous comparons avec les résultats des observations les déductions théoriques formulées ci-dessus, nous trouverons qu'il existe entre eux une concordance satisfaisante.

Suivant Loomis, on voit dans l'Amérique du Nord, sous le méridien de Washington et par le 40[e] parallèle, 10 aurores boréales par an. Sous le 42[e], ce nombre s'est élevé à 20, et près du 45[e] il comporte déjà le chiffre de 40. Sous le 50[e] degré, on constate 80 aurores boréales par année, et entre cette latitude et celle de 62[e] degré, l'aurore boréale se fait voir presque chaque nuit. Entre ces deux dernières latitudes, l'aurore boréale apparaît tout aussi souvent au sud qu'au nord et s'élève à une hauteur considérable. C'est donc ici qu'est située la zone proprement dite des aurores boréales, dont le 56[e] degré environ peut être considéré comme la latitude moyenne. Au nord du 62[e] degré, les aurores apparaissent presque exclusivement du côté du sud, et elles diminuent en nombre et en éclat à mesure que l'on s'avance vers le nord. Sous le 67[e] degré, le nombre des aurores boréales a descendu à 20, et il n'est plus que 10 aux environs du 78[e] degré. Le même fait se présente au méridien de Saint-Pétersbourg, mais ici la zone des aurores boréales est située beaucoup plus au nord qu'en Amérique. Ce n'est qu'entre le 66[e] et le 75[e] degré lat. N. que l'on constate un chiffre annuel de 80 aurores boréales ([1]).

L'expédition française au Spitzberg et en Norvége fit, dans l'hiver de 1838-1839, une foule de mesures à Bossekop sur la position de l'arc auroral. Le résultat de plus de 200 mesures fut que le sommet de cet arc était à 10 degrés à l'ouest du méridien magnétique. Argelander était arrivé

([1]) Loomis, *Annual Report of the Smithsonian Inst.*, 1866.

à peu près aux mêmes résultats par ses observations faites à Abo, en Finlande. Par suite de circonstances accidentelles, le sommet de l'arc auroral se présenta à plusieurs reprises à l'est du méridien magnétique. La position indiquée constituant la moyenne de toutes les observations est en conséquence dégagée de perturbations accidentelles [1]. Le fait que le sommet de l'arc auroral doit se présenter en moyenne dans ces régions à l'ouest du méridien magnétique découle immédiatement de la théorie, si l'on prend en considération la situation géographique et la déclinaison magnétique de la localité, comme aussi la forme et la situation de l'espace annulaire du maximum de densité électrique. Il est facile, de la même façon, de comprendre la justesse des observations d'Argelander. Par contre, dans l'Amérique du Nord comme en Sibérie, le sommet de l'arc auroral doit mieux coïncider en moyenne avec le méridien magnétique. Je ne connais toutefois pas de résultats d'observation dégagés de perturbations accidentelles de nature à confirmer ou à réfuter cette admission.

Wilcke [2] avait déjà observé que la couronne aurorale a sa place au zénith magnétique terrestre ou au voisinage de ce point. La justesse de ses observations a été confirmée plusieurs fois depuis cette époque par d'autres savants. L'expédition française mentionnée fit 43 déterminations dont le résultat moyen fut que la situation de la couronne s'écarte de moins d'un degré du zénith magnétique. La différence entre les deux positions s'éleva toutefois à 15 degrés à une occasion et à 12 degrés à deux autres occasions.

Dans l'explication de la période annuelle de fréquence des aurores boréales constatée par les observations, il faut considérer les circonstances qui suivent. Le fluide élec-

---

(1) Sur les aurores boréales vues à Bossecop et à Jupvig. Paris, 1846.

(2) *Kongl. Vetenskaps Akademiens Handlingar för* 1777 (*Mémoires de l'Académie des Sciences pour* 1777, vol. XXXVIII.)

trique accumulé dans l'atmosphère de la Terre par l'induction unipolaire de l'aimant terrestre descend à la surface de la Terre, soit par des décharges disruptives (orages), soit par de faibles courants continus; les premières ont leur principale fréquence entre les tropiques et les seconds dans les latitudes élevées. Le fluide qui ne s'écoule pas sur la Terre de la première façon est conduit par la force magnétique vers les latitudes supérieures, où il s'écoule sous la forme des courants continus. Il suit de là que plus les orages sont rares et faibles, plus les aurores boréales doivent être intenses et nombreuses, et *vice versâ*. Dans la zone des grands calmes, immédiatement au nord de l'équateur, le tonnerre se fait entendre toute l'année, mais les limites de cette zone varient d'une saison à l'autre. En dehors de la même zone, mais entre les deux tropiques, les orages se transportent de la même manière que les saisons pluvieuses avec le soleil. On peut donc admettre que la quantité du fluide électrique qui, entre les tropiques, descend dans la terre avec les orages, n'est pas la même l'année durant. Comme on le sait, les aurores boréales présentent deux maxima, savoir, aux équinoxes d'automne et de printemps. D'après notre manière de voir, les orages seraient par suite le plus faibles, ou plutôt la moindre quantité de fluide électrique descendrait en tonnerre de l'atmosphère à la surface terrestre entre les tropiques, quand le soleil passe l'équateur. Nous manquons des matériaux d'observation suffisants pour décider si cette manière de voir est correcte ou non [1].

---

[1] Il semble résulter des observations faites sur l'aurore boréale, par l'expédition arctique austro-hongroise de 1872-1874, que la zone du maximum de l'aurore boréale se déplace de manière à se trouver plus au nord pendant l'hiver et l'été qu'à l'époque des équinoxes d'automne et de printemps. Si ce fait est confirmé par des observations futures, la variation annuelle constatée à des latitudes inférieures pourra être expliquée par ce déplacement. (Voir *Nordlicht-beobachtungen der Oesterreichisch-Ungarischen arktischen Expedition* 1872-1874, von C. Weyprecht. Vienne, 1878.)

Il reste encore bien des choses obscures dans les phénomènes de l'aurore boréale et de l'électricité atmosphérique. Il suffira de signaler à cet égard les périodes séculaires dans la fréquence des aurores boréales. La relation de ces périodes avec les taches solaires trahit d'une manière positive la coopération de forces extra-telluriennes. L'exposé qui précède n'a pas la prétention de se présenter comme une théorie complète de l'électricité atmosphérique et des aurores boréales. Mon intention a été simplement de montrer que l'induction unipolaire de la Terre joue, dans l'explication de ces phénomènes, un rôle des plus importants et des plus significatifs, et qu'elle ne doit pas être négligée par les savants qui s'occuperont à l'avenir de cette matière.

RECHERCHES SUR LES RAPPORTS DE L'ANALYSE SPECTRALE AVEC LE SPECTRE DU SOLEIL;

Par M. J.-N. LOCKYER.

Lu à la Société royale de Londres, le 12 décembre 1878.

PREMIÈRE PARTIE.

DISCUSSION DE L'HYPOTHÈSE SELON LAQUELLE LES CORPS DÉSIGNÉS SOUS LE NOM DE CORPS SIMPLES SONT DES CORPS COMPOSÉS.

Plusieurs membres de la Société royale savent que j'ai travaillé, pendant ces quatre dernières années, à la confection d'une Carte du spectre solaire sur une large échelle; ce travail comprend la comparaison des lignes de Fraunhofer avec celles que fournissent les vapeurs de chaque élément métallique dans l'arc voltaïque.

Pour donner une idée de l'importance de la tâche que

j'ai entreprise, il suffit de dire que le spectre entier du Soleil aura le seizième d'un mille anglais de longueur (100^m,582), que pour dessiner les lignes métalliques dans la partie violette et purifier les spectres en suivant la méthode décrite précédemment à la Société royale, on a fait plus de cent mille observations et tiré environ deux mille clichés photographiques.

Une partie de ces photographies présentent la comparaison des spectres des vapeurs métalliques avec le spectre solaire, une autre partie la comparaison entre eux des spectres des vapeurs; enfin la dernière partie a été spécialement faite dans le but de montrer les lignes longues et courtes de chaque spectre.

Je rappelle le procédé de purification employé. Qu'il s'agisse de rechercher la présence du manganèse dans le fer, si la plus longue ligne du manganèse fait défaut, les lignes plus courtes manqueront aussi, dans l'hypothèse que les corps simples sont élémentaires. Si la plus longue ligne apparaît, le degré de l'impureté sera marqué par les plus courtes lignes présentes du manganèse.

L'hypothèse que les éléments chimiques sont des corps simples n'explique pas tous les phénomènes.— La révision de toutes les photographies des spectres des corps simples dans la région 39-40, entreprise au commencement de cette année, a duré six mois. Toutes les observations accumulées pendant la durée entière du travail ont été résumées, puis comparées aux lignes de Fraunhofer, et cette étude m'a montré qu'il est impossible d'expliquer la présence de lignes identiques communes à plusieurs spectres, par de simples mélanges.

Je montrerai en détail, dans un prochain Mémoire, à quelle étrange confusion l'on arrive dans cette hypothèse, mais je donnerai seulement aujourd'hui la partie de ces Tables qui se rapporte aux spectres du titane et du fer.

TABLE I. — *Réduction finale. Titane.*

Intensité dans le Soleil.	Longueur d'onde et intensité des lignes.	Coïncidences entre les lignes courtes.
	39	
1	0000 / 3	Zr / 4
4	0048 / 3	Th / 4
5	1040 / 5	Mn / 4, Ce / 5, Di / 3
2	1360 / 3	V / 4
5	1915 / 8	Ce / 4
4	2050 / 3	U / 3, La / 3
3	2368 / 2	V / 3
3	3718 / 5	Th / 4, Ce / 4
2	4775 / 1	Fe / 2
2	5722 / 1	Zr / 1, Rh / 3
4	6175 / 2	U / 3
3	6335 / 2	Di / 3, Ta / 5
2	8083 / 1	Fe / 2
3	8152 / 2	
1	8922 / 1	Mn / 4
2	9798 / La plus longue.	V / La plus longue.

Mo/3 Cr/4

1	0600/2	U/3 Zr/5 Yt/5
3	0622/4	V/4
2	0920/3	V/2 Ba/3
3	1010/4	V/4 Pt/3
2	1648/2	Co/3
2	1755/3	Mn/3 Ce/4
2	1835/4	Os/2
1	2700/1	V/2
1	2950/1	Mo/3
3	3023/4	Ce/4
5	3435/4	U/2
3	3475/2	Ba/2 Rh/2
3	3628/3	Ta/3

3	4422/4	Mo 3
3	4720/2	Yt 5 — Th 3
2	5012/2	Di 2
2	5160/2	Ce 3 — Ru 3
2	5210/3	W 3
2	5423/4	U 3 — Mo 3 — W 4
3	6215/3	Yt 5 — Ce 3 — Di 2
2	6571/2	Zr 2
3	6662/2	Th 1
1	7555/3	Os 2 — Ta 4 — Cr 2
3	7578/4	Di 2
2	7685/2	V 4
2	8083/2	Ti 1
	8320	Cr 3

Nous y trouvons des lignes courtes communes à plusieurs métaux dont les impuretés ont été éliminées ou dont la séparation est démontrée par l'absence des lignes les plus longues.

Preuves de la dissociation céleste. — J'ai remarqué, il y a cinq ans, que plusieurs phénomènes et diverses idées concernant la Physique du Soleil et des étoiles conduisent à cette autre hypothèse que *les corps simples eux-mêmes, ou tout au moins plusieurs d'entre eux, sont des corps composés.*

Dans une lettre écrite à M. Dumas le 3 décembre 1873, et imprimée dans les *Comptes rendus,* j'ai ainsi résumé un Mémoire qui a paru depuis dans les *Philosophical Transactions.*

« Il semble que plus une étoile est chaude, plus son spectre est simple, et que les éléments métalliques ne se font voir que dans l'ordre de leurs poids atomiques [1].

» Ainsi, nous avons :

» 1° Des étoiles très-brillantes où nous ne voyons que l'hydrogène, en quantité énorme, et le magnésium;

» 2° Des étoiles plus froides, comme notre Soleil, où nous trouvons

$$H + Mg + Na,$$
$$H + Mg + Na + Ca, Fe, \ldots,$$

dans ces étoiles, pas de métalloïdes;

» 3° Des étoiles plus froides encore, dans lesquelles *tous les éléments métalliques sont* ASSOCIÉS, où leurs lignes ne

---

[1] Par rapport aux anciens poids atomiques, dans lesquels

$$Mg = 12,$$
$$Na = 23.$$

sont plus visibles, et où nous n'avons que les spectres des métalloïdes et des composés ;

» 4° Plus une étoile est âgée, *plus l'hydrogène libre disparaît;* sur la Terre nous ne trouvons plus d'hydrogène en liberté.

» Il me semble que ces faits sont les preuves de plusieurs idées émises par vous. J'ai pensé que nous pouvions imaginer une *dissociation céleste,* qui continue le travail de nos fourneaux, et que les métalloïdes sont des composés qui sont dissociés par la température solaire, pendant que les éléments métalliques mono-atomiques, dont les poids sont les moindres, sont précisément ceux qui résistent même à la température des étoiles les plus chaudes. »

Avant d'aller plus loin, je dois remarquer que les observations du spectre solaire ont fait voir depuis que le calcium doit y être placé entre l'hydrogène et le magnésium, et que déjà les photographies du spectre des étoiles obtenues par le Dr Huggins avaient démontré le même fait, de sorte que, dans le présent état de nos connaissances, indépendamment de toute hypothèse, les faits peuvent être représentés ainsi :

	Lignes de:
Étoiles les plus chaudes.	H + Ca + Mg.
Soleil	H + Ca + Mg + Na + Fe.
Étoiles froides.	Mg + Na + Fe + Bi + Hg.
Étoiles les plus froides.	(bandes cannelées). { Métalloïdes.

C'est d'après ces idées que j'ai fait depuis plusieurs Communications à la Société royale, au sujet du spectre du calcium, dont je m'occuperai davantage dans la suite.

DIFFÉRENCES QUE L'ON DOIT OBSERVER DANS LES PHÉNOMÈNES SELON QU'ON ADOPTE L'UNE OU L'AUTRE DES DEUX HYPOTHÈSES.

Après avoir comparé les observations faites sur les spectres des métaux, en partant de l'hypothèse que les

corps simples sont réellement élémentaires, je fus, comme je l'ai déjà dit, conduit à une confusion telle, que je me résolus à étudier l'hypothèse inverse, ce qui m'a forcé naturellement à chercher en quoi les phénomènes doivent différer selon qu'on adopte l'une ou l'autre des deux manières de voir.

Mon premier soin a été de chercher laquelle de ces deux hypothèses explique ces coïncidences de lignes courtes qui persistent lorsqu'on a éliminé les raies dues aux impuretés après la réduction de toutes les autres. Appelons, pour simplifier, les lignes courtes communes à plusieurs spectres *lignes basiques*.

La nouvelle hypothèse permet de se représenter les molécules constitutives des corps supposés simples comme donnant un spectre de lignes qui varierait suivant les circonstances, celles-ci différenciant elles-mêmes ces diverses combinaisons.

Je suppose que A contienne B, comme impureté, ou comme élément, et je cherche quelle différence spectroscopique il en pourra résulter.

A, dans les deux cas, présentera son propre spectre.

B, comme impureté, ajoutera, ainsi que je l'ai montré dans un précédent Mémoire, ses lignes avec une intensité variable suivant sa proportion.

B, comme constituant, fournira ses lignes suivant l'intensité de la dissociation de A, comme je l'ai déjà montré aussi.

La seule différence consiste donc en ce que, en élevant graduellement la température, le spectre de A s'altérera si c'est un corps composé, car il sera progressivement dissocié, tandis qu'il ne s'altérera pas si c'est un corps simple.

Dans l'hypothèse que A est un corps composé d'au moins deux groupements moléculaires semblables ou dissemblables, la ligne la plus longue à une certaine température *ne le sera plus à une autre*. Le système de l'élimina-

tion des impuretés, fondé sur l'hypothèse de groupements moléculaires simples, s'écroule ; l'origine des lignes basiques devient en même temps évidente.

Des considérations générales d'un autre ordre ont rendu plus claires ces explications.

Considérations générales.

Imaginons une série de fourneaux A, B, C, D, dont A est le plus chaud et D le moins chaud.

Supposons, d'abord, que A contienne une substance α capable de former un corps composé β, soit en se combinant à elle-même, soit en s'unissant à une autre substance quand la température s'abaisse.

Fig. 1 [1].

Nous pouvons alors imaginer un fourneau B dans lequel ce corps composé existerait seul. Le spectre de ce composé β serait seul visible en B, de même que le spectre du corps supposé élémentaire est seul visible en A.

Avec une température plus basse, le fourneau C nous montrera une substance γ plus complexe et l'on pourra reproduire les mêmes considérations.

---

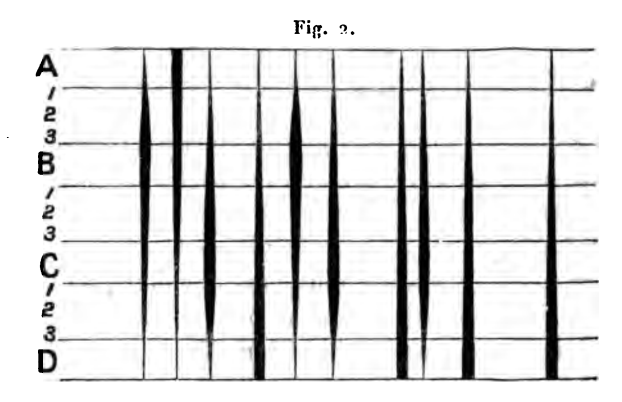
[1] Les chiffres placés à gauche de la figure entre les spectres indiquent les changements graduels qu'on observerait dans ceux-ci à des températures voisines de celles des trois fourneaux.

Si nous jetons dans le fourneau A une petite quantité de ce corps doublement composé γ, nous obtiendrons d'abord une superposition de ces trois spectres; les lignes de γ seront primitivement les plus épaisses, puis celles de β, et finalement α existera seul et le spectre sera réduit à sa plus grande simplicité.

Mais ce n'est pas la seule conclusion que nous puissions tirer de ces considérations. Puisque β, γ et δ sont, selon notre hypothèse, des composés plus ou moins complexes de α, les plus fortes lignes du dessin représenteront le spectre vrai de chacune de ces substances dans les fourneaux B, C et D qui leur correspondent. Cependant, par suite d'une incomplète dissociation de ces composés, les lignes fortes de β se verront dans le fourneau C, les lignes fortes de γ dans le fourneau D, mais elles n'apparaîtront que *comme des lignes faibles*. Ainsi, bien que nous n'ayons en C aucune ligne qui n'existe en D, les intensités des lignes en C et D seront entièrement changées.

En un mot, les lignes de α, fortes en A (*fig.* 1), seront basiques en B, C et D; les lignes de β, fortes en B, seront basiques en C et D, et ainsi de suite.

Fig. 2.



J'ai préparé un second dessin (*fig.* 2) qui représente le cas, en supposant que le fourneau A, au lieu d'avoir une

température suffisante pour dissocier complétement β, possède une température un peu inférieure à celle qui serait nécessaire, quoique supérieure à celle de B.

On voit sur ce dessin que la seule différence dans les spectres des corps placés dans les quatre fourneaux consiste dans la force relative des lignes. Les spectres des substances qui existent en A possèdent autant de lignes que ceux des substances contenues en D, et chaque ligne devient basique à son tour, dans la série entière des fourneaux, au lieu de l'être dans un ou deux seulement.

Application de ces considérations générales à l'élimination des impuretés.

Supposons que le second dessin (*fig.* 2) représente les spectres du fer décomposé d'une manière plus ou moins profonde suivant les différents degrés de chaleur. Il est évident que l'épaisseur relative de ces lignes variera, leur position seule restant constante, suivant que la température se rapprochera de celle des fourneaux A, B, C et D.

L'intensité relative des diverses raies variera : tel est le point capital. *Les lignes les plus longues, représentées sur le dessin par celles qui sont les plus épaisses, ne restent pas les mêmes quand on passe d'une température à une autre.* C'est en partant de ces considérations que j'ai déjà dit qu'on ne peut se fonder sur elles pour l'*élimination des impuretés*.

Supposons, par exemple, que le manganèse soit formé par l'union de la molécule du fer telle qu'elle est contenue dans le fourneau B avec un autre corps, et supposons, en outre, que la photographie du spectre du fer que je désire comparer avec celle du manganèse représente le spectre de ce fer, à la température du fourneau D. Pour éliminer ce manganèse considéré comme impureté dans le spectre du fer, nous commencerons par chercher les lignes les plus

fortes et les plus longues visibles à la fois dans les spectres photographiques du fer et du manganèse obtenus dans des conditions semblables. Nous ne trouvons pas ces lignes et j'en conclus que nous n'avons pas affaire à une impureté due à la présence du manganèse dans le fer. Mais bien que les lignes longues manquent, quelques-unes des lignes les plus fines parmi les lignes basiques s'y trouvent cependant, et c'est ainsi que j'explique la confusion apparente à laquelle on est conduit par cette supposition que les corps simples de la Chimie sont des éléments.

Application de ces considérations à l'étude des composés connus.

Appliquons maintenant ces raisonnements à la dissociation en ses éléments d'un corps composé connu.

Un corps composé, par exemple un sel de chaux, a un spectre aussi bien défini que celui d'un corps simple; seulement, tandis que le spectre du métal lui-même est formé de lignes dont le nombre et l'intensité peuvent varier, le spectre d'un composé est formé, en général, d'espaces cannelés et de larges bandes qui varient de la même manière suivant la quantité de matière.

Bref, en ce qui concerne leurs spectres, les effets des molécules des corps simples et de celles des corps composés paraissent être affectés de la même manière par la quantité, c'est-à-dire que *les deux séries de spectres ont leurs lignes longues et courtes*. Les lignes longues et courtes du spectre des corps simples sont représentées par des bandes et des cannelures dans le spectre des composés, et, dans l'un et l'autre cas, la plus grande simplicité du spectre correspond à la plus faible quantité de matière, et la plus grande complication à la plus grande quantité, se rapprochant ainsi d'un spectre continu.

La chaleur nécessaire pour rendre visible le spectre d'un

corps composé, tel qu'un sel de calcium, dissocie plus ou moins ce composé. Le nombre des raies du métal qui apparaissent indique la quantité de métal mise en liberté, et, à mesure que les raies du métal augmentent, les bandes du composé diminuent et s'évanouissent.

J'ai montré, dans un Mémoire précédent, comment j'ai été amené à conclure que les composés binaires ont leur spectre propre, d'après des considérations fondées sur l'observation des longueurs des raies : ce sont des observations et des raisonnements absolument semblables que je fais valoir pour établir la nature composée des éléments eux-mêmes.

Dans un Mémoire communiqué à la Société royale en 1874 et se rapportant, parmi d'autres matières, au renversement de certaines lignes dans le spectre solaire, j'ai fait les remarques suivantes (*Phil. Trans.*, vol. CXIV, Part II, p. 807) : « Il est évident qu'on devra apporter la plus grande attention au *caractère* précis aussi bien qu'à la position exacte de chacune de ces lignes de Fraunhofer, sur les épaisseurs desquelles j'ai déjà découvert de nombreuses anomalies. Je veux, pour le moment, appeler plus particulièrement l'attention sur les lignes H 3933 et 3968 qui correspondent au calcium, qui sont plus fortes dans toutes les photographies du spectre solaire que la plus large ligne de cette région 4226,3 (je puis ajouter qu'elles sont de beaucoup les lignes les plus fortes du spectre solaire). Dans le spectre du calcium, la raie 4226,3 est, au contraire, invariablement plus épaisse que les lignes H, et, de plus, elle est encore visible dans les substances qui contiennent assez peu de calcium pour qu'on ne puisse apercevoir aucune trace des deux autres.

» De semblables discordances entre les épreuves photographiques du spectre solaire et celles des éléments sont-elles dues à des causes qui proviennent des épreuves photographiques elles-mêmes ou à des différences dans les inten-

sités des diverses vibrations moléculaires dans le Soleil ou à la surface de la Terre? C'est ce que, pour le moment, je me sens incapable de discuter. »

Discussion d'une objection.

J'ai eu grand soin, au commencement de ce Mémoire, d'insister sur ce point, que mes conclusions sont fondées sur les analogies fournies par des substances que, d'un commun accord et sans discussion possible, nous sommes habitués à regarder comme composées. Si je n'avais pas insisté sur ce point on aurait, sans doute, pu me faire l'objection que voici : Les variations de spectres, que j'attribue aux dissociations nécessaires des éléments, ne sont-elles pas dues à des états vibratoires différents d'un même corps produits par des forces différentes? On pourrait ainsi rapprocher les nombreuses notes harmoniques ou fausses, que l'on obtient avec ou sans le son fondamental, lorsqu'on frappe une cloche, des lignes spectrales, produites à une haute température, et qui peuvent être ou n'être pas accompagnées de celles qu'on voit paraître à une température moins élevée. A cet argument, je répondrais qu'il prouve trop; en effet, s'il démontrait que la ligne *h* de l'hydrogène dans le Soleil est produite par le même groupement moléculaire qui donne seulement les lignes vertes quand l'étincelle est devenue très-faible, et que le gaz est contenu dans un gros globe de verre, il prouverait également que le calcium est identique avec ses sels. Nous pouvons obtenir, en effet, les spectres des sels de calcium sans les raies du calcium, aussi bien que le spectre de l'hydrogène avec les raies vertes sans la raie rouge.

Aussi je pense que cet argument ne peut être présenté par quelqu'un qui croirait à l'existence des corps composés, parce qu'il n'y a pas de différence spectroscopique entre les corps reconnus comme composés et les substances sup-

posées élémentaires. Les différences spectroscopiques entre le calcium lui-même, à différents degrés de température, sont aussi grandes qu'entre le calcium et ses sels. Il y a une parfaite continuité de phénomènes d'une extrémité de l'échelle des températures à l'autre.

HYPOTHÈSE SUR L'ARRANGEMENT PROBABLE DES MOLÉCULES FONDAMENTALES.

Les explications fournies par ces considérations m'ayant paru assez satisfaisantes, puisqu'elles ont donné tout d'abord l'explication des lignes basiques observées, mes recherches m'ont semblé dignes d'être poussées plus loin dans cette voie.

Ainsi j'ai cherché à me représenter clairement, selon le principe de l'évolution, comment les divers composés peuvent d'abord prendre naissance, puis devenir composants à leur tour.

Il m'a semblé naturel d'admettre que, lorsque la température s'abaisse, les molécules s'unissaient 2 à 2 ou 3 à 3. Si les conditions nécessaires se produisent, et que la température décroisse comme nous l'avons imaginé pour les fourneaux A, B, C, D, cette multiplication amènera une complication de la molécule telle, que le poids moléculaire de la substance ira continuellement en augmentant.

On pourrait également augmenter la complication de la molécule par l'addition de molécules de différentes origines, et, si nous représentons les résultats fournis au moyen de la première méthode par $A + A$, nous représenterons ceux que donnerait la seconde par $A + B$. La molécule produite pourrait même se compliquer en s'adjoignant une seconde molécule B, sous la forme de $(A + B)_2$ ou de $A + B_2$.

De ces trois manières de voir, il m'a semblé que la pre-

mière se prêtait à l'étude dans les meilleures conditions, car la considération des impuretés y était éliminée. D'après un travail préliminaire, il était hors de doute que telle ligne appartenait au fer, telle autre au calcium, et ainsi de suite, c'est-à-dire que telle ou telle ligne apparaissait normalement dans les spectres de ces substances. Le problème qu'il s'agissait de résoudre prenait donc cette forme : en admettant que certaines lignes sont spéciales à telle ou telle substance, chacune d'elles devient-elle basique à son tour, quand on varie la température?

Je commence donc cette étude par la preuve des faits qui se rapportent au calcium, et je chercherai ensuite si l'hydrogène, le fer et le lithium se comportent de la même manière.

APPLICATIONS DE CES VUES THÉORIQUES AU CALCIUM, AU FER, A L'HYDROGÈNE ET AU LITHIUM.

Calcium.

Dans une Communication faite il y a quelque temps à la Société Royale (*Proc.*, t. XXII, p. 380; 1874), j'avais supposé déjà que les lignes connues du spectre des corps simples pourraient bien ne pas résulter des vibrations de molécules semblables. J'étais conduit à faire cette remarque à cause des différences que l'on trouve dans les raies des spectres directs de certains éléments quand on les compare avec celui du Soleil.

Plus récemment (*Proc. Roy. Soc.*, n° 168; 1876), j'ai montré jusqu'à l'évidence que le groupement moléculaire du calcium, qui sous l'influence d'un faible courant d'induction et d'un condensateur de peu d'étendue donne un spectre dont la raie principale est dans le bleu, paraît presque détruit dans le Soleil et qu'il est complétement détruit par la décharge d'un courant énergique et d'un

puissant condensateur, formant alors un ou plusieurs groupements différents montrant des raies dans le violet.

Je disais un ou plusieurs parce qu'il m'était impossible alors de savoir si ces lignes provenaient des mêmes molécules ou de différentes molécules, et j'ajoutais que nous serions probablement obligés d'étudier le spectre des étoiles les plus brillantes avant de pouvoir résoudre la question.

Je faisais remarquer également que ce résultat nous permettait de fixer avec une très-grande exactitude les conditions électriques qui correspondent au degré de dissociation qui se manifeste actuellement dans le Soleil.

J'ai rassemblé dans la *fig.* 3 plusieurs *fac-simile* de photographies spectroscopiques dans un ordre tel, que l'on peut y suivre la chaîne du raisonnement.

Nous y voyons d'abord le spectre du chlorure de calcium non dissocié (1), puis dissocié (2); puis celui du calcium obtenu avec un faible arc voltaïque dans lequel la ligne de droite ($\lambda = 4226,3$) est renversée et plus épaisse que les deux lignes ($\lambda = 3933$ et 3968) de gauche (3). Nous avons ensuite le spectre du calcium obtenu au moyen d'un courant de haute tension; les trois lignes y sont également épaisses et toutes renversées (4).

On se rappellera que la structure cannelée du spectre des corps composés est détruite par la dissociation, tandis que le spectre de chaque élément apparaît avec ses apparences propres (3). Si la ligne épaisse du calcium représente un spectre cannelé d'un composé, et que les plus minces, qui sont les plus longues lignes élémentaires, apparaissent par suite d'une dissociation partielle, nous avons un élément qui se comporte comme un composé.

Si notre hypothèse est vraie, nous devons pouvoir obtenir, par un abaissement convenable de la température, une prépondérance encore plus grande des lignes simples; de plus, par une plus grande élévation de température, nous

devons provoquer une plus grande prépondérance des lignes

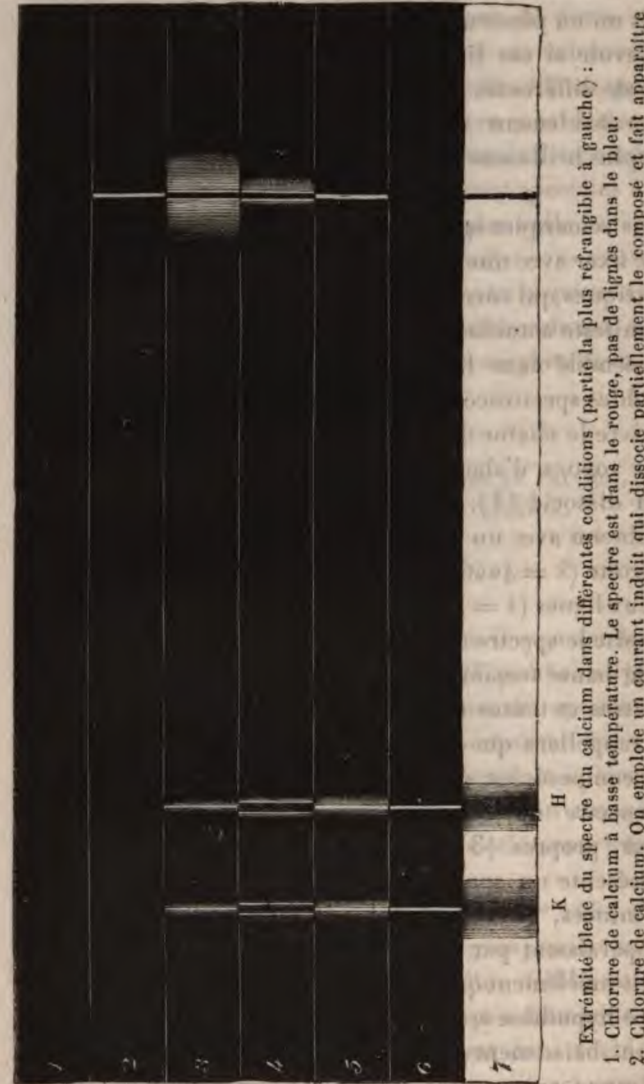


Fig. 3.

Extrémité bleue du spectre du calcium dans différentes conditions (partie la plus réfrangible à gauche) :

1. Chlorure de calcium à basse température. Le spectre est dans le rouge, pas de lignes dans le bleu.
2. Chlorure de calcium. On emploie un courant induit qui dissocie partiellement le composé et fait apparaître la raie du métal.
3. Calcium métallique dans l'arc électrique. Pile composée d'un petit nombre d'éléments.
4. Calcium métallique dans l'arc électrique. Éléments plus nombreux.
5. Étincelles de la bobine condensée par une faible bouteille de Leyde éclatant sur le chlorure de calcium.
6. Fortes étincelles obtenues avec une grosse bobine et une grosse bouteille de Leyde.

doubles. Ces conséquences de la théorie sont vérifiées.

J'ai fait usage de la Photographie, d'abord parce que l'on voit mal les lignes très-réfrangibles et aussi parce que l'épreuve ainsi obtenue est un témoin permanent et indiscutable, ce qui est très-précieux. On a employé des courants d'induction réglés de manière à rendre les résultats photographiques comparables.

Pour la plus basse température, j'ai employé un courant d'induction et un condensateur, juste assez puissants pour obtenir le cliché photographique. L'étincelle éclatait entre deux électrodes d'aluminium, dont l'inférieure, creusée en coupe, renfermait un sel de calcium.

La *fig.* 3 donne une copie exacte des résultats obtenus : à la plus basse température, on voit seulement la ligne simple (2). A la plus haute température (6), les deux lignes plus réfrangibles sont seules venues se graver sur la plaque, ce qui prouve que l'intensité des vibrations était entièrement changée dans les deux expériences.

Il n'est peut-être pas superflu de donner les raisons qui m'ont conduit à chercher des preuves nouvelles dans l'étude du spectre des étoiles.

Il est parfaitement certain que, si les substances que nous appelons *corps simples* ou pour mieux dire leurs molécules les plus ténues (celles qui donnent des spectres de lignes) sont réellement des composés, ils ont dû être formés à une très-haute température. Il est facile d'imaginer qu'il peut n'y avoir là aucune limite supérieure de température, au-dessus de laquelle de telles combinaisons sont possibles, parce que les atomes qui ont le pouvoir de se combiner ensemble à ces températures extrêmes de chaleur, n'existent plus tels aux températures inférieures ou plutôt n'existent que combinés à d'autres atomes semblables ou dissemblables. Il y aura donc association de molécules d'autant plus compliquée, que la température sera plus basse, et la dissocia-

tion quand la température s'élèvera pourra croître sans limite.

Tel est le premier point.

Voici le second :

Nous devons admettre que notre calcium, une fois formé, constitue un être distinct, qu'il soit un élément ou non. Par suite, si nous n'opérons que sur du calcium, nous ne saurons jamais si la chaleur l'amène à une ou plusieurs formes plus simples, c'est-à-dire si nous séparons le calcium en X + Y, parce que ni X ni Y ne varieront jamais.

Cependant, si notre calcium correspond à des conditions de température relativement basses, peut-être trouverons-nous des étoiles assez chaudes pour permettre à ses parties constituantes d'exister non combinées. Il peut y avoir alors plus de X dans une étoile, plus de Y dans une autre, et, s'il en est ainsi, les lignes H et K varieront d'épaisseur jusqu'à l'extrême limite où nous n'aurons que H représentant X dans une étoile et K représentant Y dans une autre. Comme conditions intermédiaires, nous aurons des cas où, bien que H et K soient toutes les deux visibles, H sera plus intense dans les unes et K dans les autres.

M. le professeur Stokes a bien voulu ajouter à la valeur de mon Mémoire, lorsqu'il a paru dans les *Proceedings,* en le faisant suivre de la note suivante :

« Quand un corps solide, un fil de platine par exemple, est traversé par un courant électrique, il est porté à l'incandescence. Nous savons que, lorsque la température s'élève, les rayons qui correspondent à chaque réfrangibilité augmentent en quantité. De plus la proportion des rayons de chaque réfrangibilité est changée de telle manière, que la proportion des rayons les plus réfrangibles croît rapidement avec la température. Par analogie, on pourra supposer que cette règle est générale pour les vapeurs, bien que, dans certains cas, le spectre soit discontinu. Ainsi, je suppose que, dans le spectre d'une vapeur, A, B, C, D, E

représentent des lignes de réfrangibilité croissante de A à E; il peut très-bien se faire qu'à une température relativement basse A soit la plus large et la plus persistante; qu'à une température plus élevée, bien que toutes les lignes aient augmenté de largeur, les intensités relatives soient changées, et que C soit la plus forte et la plus persistante, enfin qu'à une température encore plus élevée ce soit E. »

D'après ces principes, le professeur Stokes, quoiqu'il regardât les faits que j'ai mentionnés comme une preuve de la haute température du Soleil, se refusait à voir en eux une preuve décisive de la dissociation de la molécule du calcium.

Cependant, depuis la publication de cette Note où je faisais appel à l'étude du spectre des étoiles, elle a été faite avec les plus admirables résultats par le Dr Huggins.

Voici un de ces résultats :

La ligne qui, d'après les vues du professeur Stokes, devrait l'emporter sur toutes les autres, si Sirius est, comme on le pense, une étoile plus chaude que le Soleil, est si fine, au contraire, qu'elle est à peine visible et qu'elle a même échappé au Dr Huggins à la première inspection.

Dans la même étoile, la ligne H, qui appartient à un groupement moléculaire du calcium, est presque aussi intense que les lignes de l'hydrogène dessinées par Secchi, tandis que la raie K, plus réfrangible, qui est d'égale épaisseur dans le spectre solaire, n'a pu être retrouvée.

Pendant la préparation de ce Mémoire, le Dr Huggins a été assez aimable pour me communiquer le résultat de ses plus importantes observations et me permettre d'examiner plusieurs photographies récemment obtenues. Il résulte de ses recherches que dans Sirius H et *h* ont à peu près la même importance. Dans α de l'Aigle, tandis que l'importance relative de H et *h* est à peu près la même, on se rap-

proche des conditions solaires, K était indiscutablement visible, quoique beaucoup plus faible que H. Je remercie le Dr Huggins qui m'a permis d'enrichir ce Mémoire de ces observations inédites. Voici sa lettre :

« Vous serez peut-être heureux d'apprendre que dans la photographie que j'ai récemment prise du spectre de α de l'Aigle se trouve une ligne qui correspond à la plus réfrangible des raies H du spectre solaire (c'est-à-dire à K du spectre du calcium), mais elle n'a que la moitié de la largeur de la ligne qui correspond à H.

» Dans le spectre de α de la Lyre et dans Sirius la seconde ligne manque. »

Les expériences du professeur Young démontrent d'une façon évidente la présence du calcium dans la chromosphère. Il a trouvé que les lignes H et K du calcium sont fortement renversées dans le spectre de toute tache importante, et que dans les tempêtes solaires, tandis que la ligne H a été injectée 75 fois dans la chromosphère et la ligne K 50 fois, la ligne bleue ($\lambda = 4226,3$), la plus importante du calcium à la température de l'arc voltaïque, ne l'a été que 3 fois.

Dans une éclipse observée à Siam en 1875, les lignes H et K laissèrent les traces les plus vigoureuses dans le spectre de la chromosphère, tandis que la raie en G, placée dans une région d'une bien plus grande intensité photographique, ne fut pas inscrite. Dans l'éclipse américaine de cette année, les lignes H et K du calcium étaient parfaitement visibles à la base de la couronne, dans laquelle, pour la première fois, les observateurs découvrirent à peine des raies de l'hydrogène.

Si nous récapitulons les faits qui se rapportent au calcium, nous voyons que la ligne H (*fig.* 4) se distingue des autres par son existence solitaire dans Sirius. La ligne K se distingue des autres par sa naissance, pour ainsi dire, dans α de l'Aigle et par la largeur qu'elle présente dans le

spectre solaire, comparée à celle qu'elle a dans celui de l'arc voltaïque. La ligne bleue diffère, à son tour, de H et de K par sa finesse relative dans le spectre solaire, où H et K sont puissantes, et sa largeur dans le spectre de l'arc voltaïque, où H et K sont faibles. Cette ligne diffère encore des deux autres par son absence dans les orages solaires et les éclipses,

Fig. 4.
(Raie bleue). (Raie rouge).

K H — BLUE LINE — RED LINE
SIRIUS — Sirius.
SUN — Soleil.
ARC — Arc.
FLAME — Flamme.

tandis que H et K sont très-brillantes et peuvent être photographiées. Enfin, le calcium se distingue de ses sels par ce fait que la ligne bleue ne paraît dans ceux-ci qu'à une haute température, chaque sel ayant son spectre particulier, dans lequel aucune des lignes sur lesquelles je viens d'attirer l'attention n'apparaît tant que la température ne dépasse pas une certaine limite.

Fer.

Pour le spectre du fer, je limiterai mes observations à la partie visible sur mes photographies entre H et G. Ce spectre paraît bien compliqué quand on compare le nombre de ses lignes à celui de corps tels que le potassium, le sodium, le plomb, le thallium, etc., mais, à l'inverse de ceux-ci, il ne contient aucune ligne qui ne soit facilement renversée en toute occasion. Un tel spectre cependant est la simplicité même, quand on le compare à celui de substances telles que l'uranium et le cérium.

On y remarquera deux groupes de trois lignes qui sont un très-bel exemple de ces répétitions de structure que nous rencontrons dans le spectre de presque tous les éléments, et dont quelques-uns ont été signalés par MM. Mascart, Cornu et moi-même. Ces deux raies triples ne sont pas dues à la vibration du groupe moléculaire qui donne naissance à la plupart des autres lignes. Dans plusieurs photographies où le spectre du fer est comparé à celui d'autres corps, et dans d'autres où le fer apparaît comme une impureté contenue, en plus ou moins grande quantité, dans d'autres substances, ces groupes apparaissent presque seuls. Leur intensité relative, comparée avec celle du petit nombre de lignes qui restent, est complétement changée.

Ce phénomène est surtout visible dans une de ces photographies, que j'ai prise il y a trois ans, en me servant d'un fort courant induit et d'un grand condensateur, à la place de l'arc voltaïque, mode opératoire qui nécessite une exposition d'une heure au lieu de deux minutes. Le groupe voisin de G est très-bien marqué, les deux lignes voisines et plus réfrangibles sont presque aussi fortes que le groupe lui-même. Dans quelques photographies que j'ai obtenues au moyen de l'arc voltaïque, ces deux lignes sont à peine visibles, au contraire, tandis que celles du groupe placé entre H et *h* sont encore plus marquées.

Je passe maintenant à une autre série de faits. Pendant les orages solaires, les lignes du fer apparaissent quelquefois, comme on sait, dans la chromosphère. Si nous admettons que ces lignes appartiennent à un seul groupement moléculaire, nous devons penser qu'elles apparaîtront dans l'ordre de leur longueur et que les plus courtes se présenteront moins souvent que les longues; or, c'est absolument le contraire qui a lieu. Un des Mémoires les plus remarquables sur la constitution physique du Soleil est dû au professeur Young. Il y a consigné les

observations qu'il a faites sur les lignes de la chromosphère à Shumaz, dans les montagnes Rocheuses, pendant l'expédition entreprise sous les auspices du gouvernement des États-Unis. Le climat heureux et l'air pur de cette contrée, que j'ai été dans le cas de remarquer moi-même, lui ont permis de découvrir des phénomènes qu'il eût été impossible d'observer dans des conditions moins favorables. Entre autres, on a observé des projections de fer dans la chromosphère. Le registre contient des indications sur le nombre de fois que chaque ligne a été vue pendant toute la durée de l'observation et sur sa forme.

Deux lignes très-fines et très-courtes, voisines du groupe très-rapproché de G, ont été trente fois injectées dans la chromosphère, tandis qu'une de ces trois lignes ne l'a été que deux fois.

Nous sommes maintenant conduits à chercher si les deux groupes de trois lignes sont produits par un ou deux assemblages moléculaires. Les faits nous permettront, j'espère, de répondre à cette question. Je rappelle que nous voyons à peine, dans la photographie obtenue au moyen de l'étincelle, le groupe le plus réfrangible, tandis que le groupe voisin de G est très-visible. Si nous n'avions affaire qu'à un seul groupement moléculaire, l'intensité relative devrait être conservée, l'intensité absolue du système variant; tandis que si nous avons deux groupements moléculaires distincts, on peut s'attendre à ce que, dans la région observable, il se trouvera des cas où l'intensité relative sera complétement intervertie ou bien prendra une autre valeur.

Or, l'intensité relative de ces deux groupes est complétement intervertie dans les photographies du spectre solaire et du spectre de l'arc voltaïque. Les lignes peu visibles dans le spectre de l'étincelle sont très-fortes dans le spectre solaire, tandis que le groupe triple, qui est si brillant dans la photographie de l'étincelle, est représenté par des lignes

de Fraunhofer moins intenses de moitié. On ne peut donc expliquer les faits qui se rapportent aux lignes du fer de cette région en admettant qu'elles sont dues à la vibration d'une molécule unique, tandis qu'ils sont expliqués de la façon la plus satisfaisante si l'on admet l'existence d'au moins trois molécules distinctes.

Lithium.

Avant de communiquer à la Société royale les dessins comparatifs des raies courtes et longues des éléments et des raies du spectre solaire, publiés dans les *Philosophical Transactions* de 1873, j'ai répété très-soigneusement les observations faites avant moi sur la non-coïncidence des raies rouge et orange de ce métal avec les raies rouges de Fraunhofer. J'ai trouvé qu'elles ne sont pas représentées dans le spectre solaire.

Cependant la ligne violette du lithium qu'on obtient dans les photographies est représentée par une forte ligne de Fraunhofer. Aussi, appliquant la méthode précédente d'investigation, je pense que sa présence dans le spectre solaire suffit pour la différencier de toutes les autres. Pour différencier à son tour la raie rouge de la raie jaune, je n'ai eu qu'à me reporter aux recherches d'analyse spectrale de Bunsen, traduites dans le *Philosophical Magazine* (décembre 1875).

On donne (*fig.* 5) deux spectres du chlorure de lithium; dans l'un, la raie rouge est forte et la raie jaune faible; l'autre, au contraire, montre seulement une trace de raie rouge, tandis que la raie jaune est très-forte et que la raie bleue commence à apparaître. L'existence de la raie bleue du lithium se trouve également indiquée dans un discours du professeur Tyndall, inséré dans le *Chemical News*, et dans une lettre du D[r] Frankland au professeur Tyndall, datée du 7 novembre 1861. Cette lettre est si im-

portante pour ma démonstration, que je l'extrais entièrement du *Philosophical Magazine*, t. XXII, p. 472 :

« Hier, en projetant le spectre du lithium sur un écran, j'ai été surpris de voir une magnifique raie bleue. Tout d'abord, j'ai pensé que mon chlorure de lithium était souillé de chlorure de strontium. Je l'essayai avec l'appareil de Steinheil, mais il fournit un résultat normal et ne présenta pas trace de raie bleue. En lisant votre Rapport dans le *Chemical News*, je vois que vous avez observé le même fait. Pourquoi cette raie bleue se produit-elle? Appartient-elle au lithium, est-elle due à l'air incandescent ou aux pointes de charbon ? J'ai retrouvé ces bandes bleues avec le sel commun, mais elles n'étaient ni aussi belles ni aussi nettes que celles du lithium. Lorsqu'un fil de lithium brûle dans l'air, il émet une lumière rouge cramoisi; mais, si on le plonge dans l'oxygène, sa lumière devient blanc bleuâtre, ce qui me paraît devoir indiquer qu'une haute température est nécessaire pour fournir la raie bleue.

» *Post-scriptum.* — 22 *novembre* 1861. Je viens de faire sur le spectre du lithium de nouvelles expériences qui me prouvent que l'apparition de la raie bleue dépend absolument de la température.

» Le spectre du chlorure de lithium chauffé dans la flamme d'un brûleur Bunsen ne contient pas la plus petite trace de la ligne bleue. J'ai remplacé ensuite la flamme du brûleur par un jet d'hydrogène, qui produit une température plus élevée, et la ligne bleue apparaît, faible, il est vrai, mais parfaitement visible et indiscutable. J'ai ensuite fait arriver un courant d'oxygène à l'intérieur du jet d'hydrogène : l'éclat de la ligne bleue s'est accru jusqu'à ce que la température de la flamme ait été assez forte pour fondre le platine, ce qui a mis fin à l'expérience. »

Ces observations des professeurs Tyndall et Frankland établissent une différence entre cette ligne bleue et celle

que l'on aperçoit à une température plus basse. La ligne violette, dont j'ai précédemment parlé, se distingue des précédentes parce qu'elle est la seule qui se trouve visiblement renversée dans le spectre solaire. Aussi, dans l'état actuel de nos connaissances, nous pouvons représenter les divers spectres du lithium de la façon suivante.

Fig. 5.

SUN	Soleil.
ARC	Arc.
FEEBLE SPARK	Étincelle faible.
FLAME	Flamme.

Il est remarquable que le lithium qui subit une telle série de transformations donne, à une température relativement basse, des composés qui sont détruits à la température du brûleur Bunsen. Aussi le spectre propre du chlorure de lithium n'a-t-il jamais pu être obtenu.

Hydrogène.

Tous les phénomènes de variabilité et d'inversion d'intensité que nous présente le spectre du calcium peuvent être comparés à ce que nous connaissons du spectre de l'hydrogène.

Le Dr Frankland et moi, nous avons fait un travail sur ce sujet, en 1869 (*Proceedings,* n° 12). Nous avons reconnu alors que la ligne *h* offre des particularités exceptionnelles et que le spectre tout entier de l'hydrogène peut se réduire à la ligne F :

« 1. La ligne de Fraunhofer du spectre solaire nommée *h* par Angström, ligne qui est due à l'absorption de l'hydrogène, n'est pas visible dans les tubes que nous excitons avec une pile faible et une bouteille de Leyde. Sa présence peut donc être regardée comme l'indication d'une température relativement élevée. L'un de nous a découvert

cette ligne renversée dans le spectre de la chromosphère, ce qui montre que cette couche, assez froide pour absorber, est encore à une température relativement haute.

» 2. Dans certaines conditions de température et de pression, le spectre compliqué de l'hydrogène se réduit, dans notre instrument, *à une seule ligne verte* qui correspond à la raie F du spectre solaire. »

De même que pour le calcium, l'étude du spectre solaire nous apporte des renseignements précieux. La ligne *h* manquait dans les protubérances en 1875, ainsi que le montre l'extrait suivant du Mémoire de l'expédition qui a été organisée pour observer cette éclipse :

« Pendant la première partie de l'éclipse, deux fortes protubérances voisines furent aperçues. Vers la fin, elles furent partiellement voilées. En même temps, une autre série de protubérances se présenta à l'autre bord. Les plus fortes de ces protubérances se répétaient trois fois dans l'instrument, par l'effet du prisme. Nous aurons, si c'est possible, à déterminer les longueurs d'onde qui correspondent à ces trois images.

Nous espérons, *a priori,* trouver les lignes de l'hydrogène, c'est-à-dire F, la ligne voisine de G et *h*. Or, F est juste à la limite de la partie photographique du spectre, et nous trouvons des images de protubérances dans cette région. La partie froide de la couronne donne un spectre continu, qui nous permet d'avoir une idée de la région dans laquelle les lignes des protubérances sont situées. C'est ce qui nous permet d'affirmer provisoirement que la ligne la moins réfrangible observée sur la photographie de la protubérance appartient à F.

Dans le but de déterminer la position de la ligne suivante, nous avons étudié le pouvoir dispersif du prisme. « Le prisme étant placé sur la table d'un goniomètre, au minimum de déviation pour F, nous avons trouvé, au moyen de plusieurs déterminations, que la distance

angulaire entre F et la ligne suivante Hγ de l'hydrogène, voisine de G, est de 3 minutes. Le goniomètre était gradué de 15 en 15 secondes; et à cause du faible pouvoir dispersif du prisme et de la largeur relative de la fente, ces déterminations ne devront être regardées que comme approximatives.

Si nous revenons maintenant à nos photographies et si nous calculons la distance angulaire entre le premier et le second anneau des protubérances, nous trouvons 3′15″. Aussi nous concluons que ce second anneau est également dû à l'hydrogène.

Nous avons fait la même recherche pour la troisième ligne photographique de l'hydrogène appelée *h*, mais nous n'avons pas trouvé de protubérances sur notre photographie, correspondant à sa longueur d'onde. Bien que cette ligne soit toujours plus faible que Hγ, son absence est surprenante, si elle n'est pas due à ce qu'elle ne se produit qu'à une très-haute température, ce qui paraît probable d'après les recherches de Frankland et Lockyer (*Proc Roy. Soc.*, vol. XVII, p. 453).

» Parlons maintenant de la dernière et de la plus brillante des séries de protubérances visible sur nos photographies. La distance entre cette série et celle que nous avons attribuée à Hγ est un peu plus grande que la distance de Hβ à Hγ. En supposant que ces distances soient égales, nous en concluons que les carrés des inverses des longueurs d'onde de ces trois séries sont en progression arithmétique, ce qui est vrai selon une première approximation. Nous avons calculé ainsi la longueur d'onde de la ligne inconnue qui donne la troisième image des protubérances; nous l'avons trouvée un peu plus faible que 3957 dix-millionièmes de millimètre. Il ne faudra pas ajouter une trop grande confiance à l'exactitude de ce nombre; mais cette ligne nous a paru placée à l'extrémité du spectre visible.

» Pour déterminer à quel élément cette ligne appartient, nous avons fait quelques recherches au moyen de la Photographie et de la fluorescence, afin de décider si l'hydrogène possède une ligne brillante dans cette région, mais nos expériences ne nous ont pas encore permis de conclure. Un tube à vide contenant de l'hydrogène préparé par Geissler présente une forte ligne plus réfrangible que H ; mais ces mêmes tubes présentent, entre $H\beta$ et $H\gamma$, d'autres lignes qui n'appartiennent pas à l'hydrogène, et c'est pour cette raison qu'il est difficile d'assigner une origine certaine à la raie ultra-violette.

» Le spectre fourni par l'étincelle électrique, éclatant dans l'hydrogène à la pression atmosphérique, présente, dans ces conditions, moins de chances de contenir des impuretés. Mais alors un spectre continu s'étend sur le violet et l'ultra-violet, ce qui empêche l'observation d'aucune ligne. Nous essayons, dans ce moment-ci, de nouvelles expériences pour résoudre ce problème.

» Si cette ligne n'est pas due à l'hydrogène, on se demandera quelle substance a pu la produire. Il est remarquable que la longueur d'onde calculée est très-voisine de H du calcium. Young a trouvé que les lignes du calcium sont presque toujours renversées dans la pénombre et au voisinage immédiat de toute tache solaire importante. Il est donc probable que le calcium peut s'élever assez haut dans la chromosphère. Nous attirons l'attention sur cette coïncidence, mais nos photographies ne nous permettent pas d'en tirer aucune conclusion certaine.

» Cependant nos expériences semblent prouver que la lumière photographique des protubérances est due surtout à une raie ultra-violette qui ne paraît pas appartenir à l'hydrogène. Les protubérances photographiées par cette raie ultra-violette semblent s'élever plus haut que les protubérances d'hydrogène, mais cet effet peut être attribué à la grandeur relative de la raie. »

Dans mes remarques, j'ai rappelé que la raie, que nous avons été conduits à attribuer au calcium en 1875, a été attribuée à cet élément dans l'éclipse de cette année. Les observations ont, en outre, montré ce fait curieux que, lorsque les lignes de l'hydrogène étaient les plus brillantes dans la couronne, les lignes du calcium n'étaient pas visibles. Les lignes de l'hydrogène étaient encore brillantes, la ligne *h* disparaissant (ce qui indique probablement un abaissement de température), le calcium commençait à être indiscutablement visible. Finalement, après la disparition des lignes de l'hydrogène, les raies du calcium devenaient les plus brillantes du spectre de la couronne.

Pour en revenir à la raie *h*, nous avons montré, en 1869, le Dr Frankland et moi, qu'elle n'apparaît que lorsque l'on emploie une haute tension; elle était absolument absente des lignes de l'hydrogène lors de l'éclipse de 1875.

Une autre observation qui complète cette série de faits, c'est que la ligne *h* est toujours la plus courte ligne de l'hydrogène dans la chromosphère.

Je soumets à la Société royale une photographie du spectre de l'indium, dans laquelle (fait remarqué par Thalèn) la ligne la plus forte appartient à l'hydrogène (*h*), tandis que la ligne de l'hydrogène voisine de G manque. J'ai observé la ligne C dans l'étincelle produite par le passage d'un courant induit entre des pôles d'indium dans l'air sec.

Comme je savais qu'il est presque impossible de rendre l'air absolument sec, j'ai institué les expériences comparatives suivantes. Un faible courant d'air, desséché par son passage au travers d'un tube en *u*, de 1 pied ($30^c,48$), contenant du chlorure de calcium, et d'un flacon de Wolf contenant de l'acide sulfurique, a été dirigé lentement dans un tube en verre muni de deux électrodes en platine, séparées par une distance d'un demi-pouce ($12^{mm},7$). J'ai observé le spectre de l'étincelle d'induction, produite par cinq piles

de Grove, une bobine et un condenseur, et éclatant dans ce tube.

J'ai comparé très-soigneusement l'éclat et la largeur des raies de l'hydrogène et des raies de l'air. Ceci fait, j'ai introduit dans le tube un petit morceau d'indium métallique et je l'ai placé de telle façon, qu'il pouvait reposer par sa base sur l'un des pôles et que l'autre extrémité était à peu près à une distance d'un demi-pouce de l'autre pôle. Après la première observation avec les pôles de platine, j'ai fait passer l'étincelle entre les armatures d'*indium* et de platine : les raies rouges et bleues de l'hydrogène ont été observées deux fois par mon ami M. G.-W. Hemming et par moi-même, et leur éclat était très-brillant. Cette indication indiscutable de la présence de l'hydrogène, ou plutôt de cette forme de l'hydrogène qui fournit la raie *h* seule, unie à l'autre forme qui donne la raie rouge et la raie bleue, montre que cette coïncidence dans la photographie n'est pas due au hasard, mais que cette forme spéciale de l'hydrogène a réellement existé dans l'arc, qu'elle vient de l'indium, qu'elle s'est enregistrée elle-même sur le cliché photographique, alors que l'hydrogène ordinaire refuse absolument de le faire.

Bien que je fusse satisfait d'une série d'expériences montrant que l'hydrogène occlus se comporte comme l'hydrogène ordinaire, j'ai prié mon ami M. W.-C. Roberts, chimiste de la Monnaie, de me préparer un morceau de palladium chargé d'hydrogène. J'ai montré à la Société royale une photographie sur laquelle les spectres de l'indium et de ce palladium hydrogéné sont situés à côté l'un de l'autre; on y voit que l'une des formes de l'hydrogène est distinctement inscrite sur le spectre de l'indium, tandis que le spectre du palladium n'en présente pas trace. J'ajouterai que le palladium avait été conservé dans un tube scellé jusqu'au moment de l'expérience et que des précautions spéciales avaient été prises pour empêcher l'échauffe-

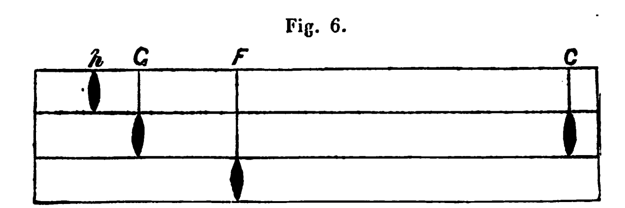
ment des deux électrodes entre lesquelles l'étincelle éclatait.

En résumé, nous voyons que la ligne *h* se distingue des autres parce qu'elle apparaît seule dans le spectre de l'indium, qu'elle faisait défaut lors de l'éclipse de 1875, tandis que les autres de l'hydrogène y étaient visibles ; qu'elle existe seulement à l'état de ligne courte dans la chromosphère, enfin par ce fait que, dans les expériences de 1869, elle ne se produisait qu'à une haute température.

Pour ce qui est de nos expériences de 1869, j'ai montré à la Société le globe contenant de l'hydrogène qui nous a permis, au Dr Frankland et à moi, d'obtenir seule, sans la ligne rouge et la ligne bleue, la ligne verte F.

Le dessin suivant montre comment ces lignes se manifestent toutes à la fois dans le spectre du Soleil.

Fig. 6.



J'ai des preuves qui, si elles se confirment, mènent à cette conclusion que la ligne jaune non renversée de la chromosphère et celle qui correspond à la division 1474 de l'échelle de Kirchhoff, appelée *ligne de la couronne,* sont dues à d'autres formes de l'hydrogène. L'une de ces formes est peut-être plus simple que celle qui fournit la raie *h* seule ; l'autre, plus complexe que celle qui donne la raie F. L'évidence sur ce point est extrêmement importante, tant pour l'étude physique du Soleil que pour la connaissance de la structure générale des étoiles. Je réserve cette étude pour une Communication postérieure.

Je me contente pour le moment de donner un dessin sur lequel j'ai disposé les divers groupements de l'hydro-

gène, tels qu'ils paraissent exister dans les régions à hautes températures jusqu'aux régions relativement froides de

Fig. 7.

h G F 1474 D3 C
SUN
CHROMOSPHERE
JAR SPARK
SPARK WITHOUT JAR
FEEBLEST SPARK AT LOWEST PRESSURE
COOLER STILL

notre astre central ; c'est-à-dire : soleil, — chromosphère, — étincelle avec condensateur, — étincelle sans condensateur, — étincelle faible à faible pression, — température encore plus basse.

Résumé des faits qui précèdent.

Je pense que les faits que je viens de rapporter peuvent être groupés ensemble et former une série de phénomènes d'une continuité parfaite, si l'on se fonde sur l'hypothèse des dissociations successives, analogues à celles que nous pouvons observer pour les composés connus.

Recherches ultérieures.

Quand nous étudions d'autres procédés d'évolution dont j'ai déjà parlé et que j'espère discuter dans une prochaine occasion, le travail devient très-compliqué, à cause de la grande difficulté que l'on éprouve pour se procurer des échantillons suffisamment purs. Je remarque cependant que la cause de la présence constante de la même impureté et dans les mêmes proportions n'est pas difficile à reconnaître et donne à penser.

J'exprime mes remerciements à tous ceux qui m'ont procuré des substances pures pendant cette série de recherches : spécialement au Dr Russell, qui m'a donné

plusieurs échantillons provenant du regretté Matthiessen, et du cobalt et du nickel préparés par lui-même; au professeur Roscoe qui m'a procuré du vanadium et de l'alun de cœsium; à M. Crookes, pour le thallium; à M. Roberts, chimiste de la Monnaie, qui m'a procuré de l'or, de l'argent, et du palladium purs, au Dr Hugo Muller, qui m'a largement pourvu de cuivre électrolytique; à M. Holzmann, qui m'a donné du cérium, du lanthane et du didyme extraits par lui-même; à M. George Matthey, auquel je dois du magnésium et de l'aluminium d'une pureté merveilleuse; enfin, à MM. Valentine, Mellor, etc.

La plus grande partie du travail exécuté pendant ces quatre dernières années a consisté dans l'élimination des impuretés; on comprendra donc que je sois bien pénétré de la nécessité d'être prudent dans les recherches spectrales. Cependant, il m'a paru que, pour un certain nombre de corps, la présence des impuretés est négligeable, et qu'elles permettent de rechercher s'ils sont simples ou composés.

J'ai abordé ce sujet devant la Société royale parce que j'espère que d'autres expérimentateurs pourront aider dans ce travail, où les efforts d'un seul individu sont comme une goutte d'eau dans l'Océan. Si j'ai dit autrefois qu'il était nécessaire de refaire les dessins des spectres en se plaçant à un autre point de vue, aujourd'hui je dirai que l'arc voltaïque doit remplacer l'étincelle, et la photographie la vue. Un coup d'œil jeté sur l'extrémité rouge du spectre de presque chaque corps incandescent dans l'arc voltaïque, au moyen d'un spectroscope doué d'une forte dispersion, et sur des dessins faits par des observateurs comme Huggins et Thalèn, qui ont employé les courants électriques, donnera une idée de la masse des faits qui restent à observer.

Je terminerai en établissant qu'une faible partie du travail sur lequel j'ai attiré votre attention est mon ouvrage. Dans la généralité des cas, j'ai simplement interprété les

observations d'autrui. Pour les observations qui ont été faites dans mon laboratoire, je dois répéter que je dois beaucoup à l'habileté et au zèle infatigable des personnes qui m'ont aidé. Le fardeau des réductions finales a été porté par M. Miller, mon assistant actuel; les dessins qui représentent les positions et les intensités des lignes ont été faits par MM. Freswell, Meldola, Ord et Starling.

Je dois remercier également M. Ewings, qui a préparé les divers dessins que j'ai portés à la connaissance de la Société.

NOTE PRÉLIMINAIRE SUR LES SUBSTANCES QUI PRODUISENT LES RAIES DE LA CHROMOSPHÈRE.

(Lue à la Société royale de Londres le 25 janvier 1879.)

Depuis qu'on observe les raies de la chromosphère par la méthode imaginée par M. Janssen et par moi en 1868, on pense être témoin, dans les tempêtes solaires, de ces éruptions de vapeurs métalliques qui seraient si fréquentes dans la photosphère.

Une discussion préliminaire de la masse énorme d'observations consignées par les astronomes italiens (principalement par le professeur Tacchini), par le professeur Young et par moi-même, me porte à penser que cette manière de voir est très-probablement inexacte. Les lignes observées sont, dans presque tous les cas, ce que j'ai appelé autre part des *raies basiques;* je n'en signalerai que les suivantes :

b^3,	attribuée	par Angström et Kirchhoff	au fer et au nickel;
b^4,	»	par Angström	au magnésium et au fer;
5268,	»	»	au cobalt et au fer;
5269,	»	»	au calcium et au fer;
5235,	»	»	au cobalt et au fer;
5017,	»	»	au nickel;
4215,	»	»	au calc., mais par moi au nickel.
5416,	ligne indéterminée.		

Ainsi, en poursuivant le raisonnement employé dans mon Mémoire, les lignes brillantes de la chromosphère solaire sont surtout dues aux bases non encore isolées des soi-disant éléments, et les phénomènes solaires sont, selon toute probabilité, entièrement dus à la *dissociation* dans la couche photosphérique et à l'*association* dans des couches plus élevées de ces mêmes bases. De la sorte, les courants verticaux ascendants et descendants dans l'atmosphère solaire, l'absorption interne que signalent les taches, l'association de celles-ci avec les facules, et le spectre paraissant continu de la couronne aussi bien que la structure même de celle-ci, tout se trouve facilement expliqué.

Nous sommes encore aussi loin que jamais de la démonstration de la cause de la variation de la température du Soleil, mais l'abondance du calcium qui accompagne le minimum des taches et celle de l'hydrogène qui signale le maximum s'expliquent naturellement dans notre hypothèse et semblent indiquer que la température de la région la plus chaude du Soleil est très-proche de celle de la couche absorbante dans les étoiles du type Sirius et de la Lyre. Si l'on concède l'existence dans la chromosphère de molécules fondamentales, existence prouvée par la présence de lignes brillantes, il s'ensuit que dans l'arc électrique, où nous retrouvons aussi très-souvent ces lignes dans le spectre de différents métaux, il existe aussi des molécules fondamentales.

DE L'INFLUENCE DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE SUR LA NUTRITION DES VÉGÉTAUX;

PAR L. GRANDEAU,
Directeur de la station agronomique de l'Est,
Professeur à l'École forestière et à la Faculté des Sciences.

REMARQUES PRÉLIMINAIRES.

C'est un fait d'observation bien connu que, dans les forêts soumises au régime de la futaie, le sous-bois a disparu : le sol est généralement recouvert par une végétation languissante et les espèces qui forment le tapis n'acquièrent jamais les mêmes dimensions qu'en rase campagne : de même, dans les taillis sous futaie, l'influence des arbres de haute taille se fait sentir sur la végétation environnante. Le *couvert*, pour me servir d'une expression consacrée dans le langage forestier, exerce sur les plantes (végétaux de petite taille, arbres ou arbustes) une influence que l'œil le moins expérimenté peut constater.

On a également remarqué, depuis longtemps, que dans le périmètre d'un arbre isolé, dépourvu de branches jusqu'à une certaine hauteur, la végétation est peu développée et ne parcourt d'ordinaire qu'une partie de ses phases normales. C'est ainsi que, dans une vigne par exemple, les ceps placés sous un arbre (pommier, cerisier, etc.) produisent peu de raisins et donnent rarement des fruits mûrs, bien que l'air et la lumière circulent tout aussi librement autour de ces ceps que dans tout autre point de la vigne. Les arbres élevés, peupliers, platanes, etc., qui bordent les champs en culture produisent sur les récoltes avoisinantes des effets analogues.

En étudiant les causes multiples invoquées pour expli-

quer ce phénomène (diminution dans l'éclairage, influence de la lumière verte réfléchie par les feuilles, racines traçantes pénétrant sous les récoltes qui bordent les routes, etc.), j'ai été conduit à supposer qu'on avait jusqu'ici négligé dans l'interprétation de l'action du *couvert* un facteur important, le pouvoir conducteur des végétaux pour l'électricité atmosphérique, la présence d'un arbre à haute tige devant soustraire les plantes sous-jacentes à l'influence de l'électricité, et cela dans un rayon qui dépasse la surface comprise dans la projection verticale de l'arbre.

La lecture de quelques passages du remarquable *Traité d'électricité statique*, publié dans le courant de l'année 1876 par M. E. Mascart, vint me confirmer dans cette manière de voir et me donner l'idée des expériences qui font l'objet des Mémoires présentés à l'Académie des Sciences, dans les séances des 8 juillet, 5 août et 9 décembre 1878.

Dans le paragraphe relatif au siége de l'électricité atmosphérique, M. E. Mascart reproduit les réflexions suivantes, dues à M. Thompson :

« Considérons maintenant une portion étendue de la surface de la Terre, unie ou couverte d'accidents de toute nature. La quantité totale d'électricité qui y sera contenue sera très-approximativement la même que sur une nappe liquide absolument calme qui serait la projection de la surface réelle ; mais cette quantité d'électricité sera distribuée d'une façon très-irrégulière, plus grande sur les parties proéminentes et les surfaces convexes, plus faible sur les parties abritées et concaves : absolument *nulle* dans l'intérieur d'une cavité, *sur le sol d'une forêt,* sur les parois d'un tunnel ou d'un appartement, alors même que les ouvertures auraient une valeur angulaire considérable (1). »

Dans le Chapitre relatif au paratonnerre, M. E. Mascart s'exprime ainsi au sujet des moyens de protection à em-

(1) MASCART, t. II, p. 577; THOMPSON, *Reprint of papers*, p. 192 et suiv.

ployer contre l'électricité : « Le moyen le plus correct de soustraire un corps à l'action de l'électricité des nuages serait de l'entourer complétement par un conducteur fermé ou simplement par une sorte de grillage métallique relié à la terre à l'aide de communications multiples. En supposant même qu'il n'y ait aucun écoulement d'électricité, un pareil conducteur reste toujours au potentiel du sol et maintient le même potentiel sur tous les corps, conducteurs ou non, qu'il enveloppe. Si ce grillage est, en outre, muni de pointes nombreuses disséminées de toutes parts, les fuites d'électricité auront lieu de plusieurs côtés à la fois, par l'intermédiaire des conducteurs dont la section sera toujours suffisante, et l'appareil présentera les meilleures garanties de protection. C'est là le principe que M. Melsens a appliqué dans la construction du beau paratonnerre dont il a entouré l'Hôtel de Ville de Bruxelles (¹)... »

Le moyen employé pour garantir l'Hôtel de Ville de Bruxelles des dégâts de la foudre, dont le principe est celui de la cage de Faraday, m'a paru applicable à l'étude de l'influence exercée par l'électricité atmosphérique. Mon savant ami, M. E. Mascart, dont les avis et les conseils me sont si précieux, a ratifié le projet d'expériences que je lui ai soumis au commencement de l'année 1877 et, dès le mois de mars de la même année, je commençai mes essais. Au moment où je les entrepris j'avais en vue un double but : je me proposais en premier lieu d'étudier, ce qui n'a pas, que je sache, été fait avant moi, l'action de l'électricité de l'air, avec ses tensions variables, sur la nutrition des plantes; secondement son influence sur la prétendue nitrification dans le sol des matières hydrocarbonées (cellulose, etc.), par leur combinaison directe avec l'azote de l'air (²). Entière-

---

(¹) MASCART, t. II, p. 565.

(²) M. J. Dehérain a cru pouvoir tirer cette conclusion des intéressantes expériences de M. Berthelot sur la fixation de l'azote sous l'influence de l'effluve.

ment édifié sur les véritables sources de l'azote du sol et des plantes par l'étude très-approfondie des beaux travaux de M. Boussingault et de M. Schlœsing sur la nitrification, et des récentes recherches du Directeur de l'École d'application des manufactures de l'État sur la circulation de l'ammoniaque dans l'atmosphère, j'avais *a priori* la conviction que l'électricité atmosphérique ne joue aucun rôle dans la nitrification du sol, entendue dans le sens de la combinaison directe de l'azote de l'air avec les matières hydrocarbonées de la terre végétale. Les expériences que je rapporte plus loin m'ont confirmé dans cette manière de voir : mes essais de culture du maïs et de tabac ont, en outre, mis une fois de plus en lumière la part importante que prend l'ammoniaque de l'air dans la formation des principes azotés des végétaux.

Je diviserai ce Mémoire en trois Parties, consacrées aux études suivantes :

1° Influence de l'électricité atmosphérique sur la nutrition des végétaux ;

2° L'électricité atmosphérique, la nitrification du sol et l'assimilation de l'ammoniaque de l'air par les plantes;

3° Résumé et conclusions. Applications à la Physique du globe, à la Sylviculture et à l'Agriculture.

Dans un Appendice à ce Mémoire, j'ai cru intéressant de donner un résumé des expériences anciennes de l'abbé Nollet, de l'abbé Bertholon et de quelques physiciens du siècle dernier sur l'influence de l'électricité statique et atmosphérique, sur les plantes et sur les animaux.

I. — Influence de l'électricité atmosphérique sur l'assimilation chez les végétaux.

A. — *Expériences sous la cage isolante* (1877).

Fidèle aux principes fondamentaux de l'expérimentation physiologique, si bien mis en évidence par mon il-

lustre maître Cl. Bernard, je me suis astreint à observer constamment les deux règles suivantes : 1° variation d'une seule des conditions dans chaque expérience ; 2° épreuve et contre-épreuve faites simultanément.

Afin de constater par une expérience directe si l'électricité atmosphérique, dont je ne pouvais mesurer ni la grandeur ni les variations incessantes, exerce ou non une influence sur la végétation, j'ai placé successivement, dans des sols plus ou moins différents d'origine, de richesse variable en principes nutritifs, de profondeurs diverses, etc., mais toujours identiques deux à deux pour chaque expérience, deux plantes de même espèce aussi comparables que possible, se trouvant dans des conditions absolument semblables à tous égards, sol, humidité, éclairement, etc., sauf une seule, celle que je voulais étudier, l'état électrique de l'atmosphère ambiante.

Pour réaliser ce programme, j'ai adopté, dans les essais de 1877, le dispositif suivant. Deux caisses métalliques A et B, percées de trous à leur partie inférieure (*fig.* 1 et 2), contenant chacune 19 kilogrammes de la même terre, sont enfouies dans le sol du jardin de la station agronomique, aux $\frac{5}{6}$ environ de leur hauteur.

La caisse A est exposée à l'air libre, la caisse B est surmontée d'une cage légère en fil de fer, haute de $1^m,50$ et mesurant $0^m,40$ dans ses deux autres dimensions : cette cage est formée de quatre montants en fer de $0^m,01$ de diamètre, reliés entre eux par un treillis de fil de fer fin ($0^m,0005$), à mailles de $0^m,15$ sur $0^m,10$. Cette cage donne donc un libre accès à l'air, à la lumière, à l'eau, etc. ; elle n'a d'autre effet que de supprimer *entièrement*, pour la plante qu'elle enveloppe, l'action de l'électricité atmosphérique. Les deux caisses sont situées à peu de distance l'une de l'autre ; elles reçoivent, également et pendant le même temps, les rayons du soleil, la pluie, etc. Dans l'un des angles de chacune des caisses on a placé, au

début de l'expérience, deux boîtes métalliques, étanches, contenant le même sol que les caisses et destinées à servir de témoins dans les variations que la terre sans récoltes éprouvera dans sa composition par son contact prolongé avec l'atmosphère.

Le sol qui a servi à remplir les caisses et les témoins, le 1[er] avril 1877, est un sol silicéo-calcaire, de fertilité

Fig. 1.



moyenne, pris au pied d'un épicéa : le sol tamisé était parfaitement homogène ; il présentait la composition physicochimique suivante :

Eau.............	15,5		
Calcaire..........	20,3	contenant :	Pour 100.
Sable grossier.....	39,7	Acide phosphorique..	0,26
» fin.........	16,9	Potasse............	0,13
Argile............	4,3	Azote nitrique......	0,00507
Matière organique..	3,4	» ammoniacal...	0,00563
	100,1	» organique....	0,15677

Première expérience (tabac). — Le 7 avril, on plante dans chacune des deux caisses A et B, un pied de tabac (variété d'Alsace) provenant de la même couche, pesant $3^{gr},5$ et portant quatre feuilles primordiales. Ces plants, tout à

Fig. 2.



fait identiques, étaient complétement repris le 14 avril. A partir du 20 du même mois environ, jusqu'au jour de la récolte (7 août), on constate des différences très-notables dans le développement des deux tabacs : celui qui végétait à l'air libre se comportait comme les plants élevés à côté de lui en pleine terre ; le pied de tabac placé sous cage croissait beaucoup moins rapidement en hauteur et en

diamètre. Tous deux étaient vigoureux; leurs feuilles, très-vertes, dénotaient un fonctionnement régulier, bien que sensiblement différent en intensité, de la cellule chlorophyllienne. Le 7 août, le plant A avait fleuri et les graines commençaient à se former; le plant B, très en retard relativement au premier, présentait à peine quelques boutons fort éloignés de leur épanouissement; il n'avait pas une seule fleur.

Afin de soumettre avant l'hiver une autre espèce végétale aux mêmes influences, on mit fin, le 7 août au soir, à cette expérience, qui avait duré quatre mois et quelques jours. Les plants de tabac, débarrassés avec grand soin de la terre adhérente aux racines, ont été mesurés et pesés exactement; on les a ensuite desséchés avec précaution et l'on a procédé à la détermination des taux de substance sèche, d'azote et cendres. Voici les résultats obtenus :

		Tabac		
	hors cage.		sous cage.	
Hauteur totale	$1^m,05$		$0^m,69$	
Nombre des feuilles	14		10	
Poids des feuilles fraîches	107^{gr}		70^{gr}	
Poids moyen d'une feuille	7,64		7	
Poids des tiges et des racines	106		70	
Poids total de la récolte	273		140	
Poids de la substance sèche — feuilles	13	30^{gr}	8,5	$17^{gr},5$
Poids de la substance sèche — tiges et racines	17		9,0	
Taux p. 100 de la substance sèche	10,99		12,5	
Azote total p. 100 de subst. sèche	1,21		1,21	
Taux de cendres pour 100 de la substance sèche	10,34		13,83	

L'analyse immédiate des deux tabacs a donné les résultats consignés dans le tableau suivant.

COMPOSITION IMMÉDIATE DE LA RÉCOLTE

	Hors cage.		Sous cage.	
	Trouvée.	En cent.	Trouvée.	En cent.
	gr.		gr.	
Eau	243,000	89,01	122,500	87,50
Matières azotées	2,269	0,83	1,325	0,94
Mat. hydrocarbonées	24,629	9,02	13,755	9,82
Cendres (mat. min.)	3,102	1,14	2,420	1,74
	273,000	100,00	140,000	100,00

La plante soustraite à l'électricité a pris, on le voit, un développement bien inférieur à celui de la plante exposée à l'air pourvu de son électricité. Elle a produit, comparée à cette dernière, les taux centésimaux suivants :

	Pour 100.
Matière vivante totale	51,28
Matière azotée	58,39
Substance hydrocarbonée (cellulose, amidon, etc.)	55,85
Cendres	78,02

Je reviendrai plus loin sur ces variations.

Deuxième expérience (maïs caragua). — Le 8 août 1877, on remplace les tabacs par deux pieds de maïs provenant de graines semées dans le même sol, le 20 juillet. Ces plants sont de tous points comparables ; ils mesurent 0^m,18 de hauteur et pèsent chacun 2^{gr},8. Le 10 août, on place la cage métallique sur la caisse A et on laisse libre la caisse B. Ce changement de place de la cage métallique avait pour objet de s'assurer que quelque condition inconnue n'avait pas troublé, dans la première expérience, le phénomène attribué à l'absence d'électricité. Le 13 août, la reprise des maïs est parfaite. Le 21 du même mois, la différence dans le développement des deux maïs est déjà très-sensible et de même sens que celle observée chez les tabacs, le plant sous-

trait à l'influence électrique s'accroissant beaucoup moins que le plant à l'air libre.

Le sol des deux caisses n'ayant reçu aucune fumure avant la récolte de tabac, il me parut utile d'en accroître la fertilité, afin de voir si l'augmentation de la teneur du sol en azote, potasse et acide phosphorique assimilables diminuerait les différences observées dans l'expérience précédente et dues exclusivement à l'état électrique de l'atmosphère ambiante.

Le 23 et le 24 août, on arrose très-également chacun des deux pieds de maïs (en trois fois) avec deux litres de solution nutritive possédant la composition suivante :

Nitrate de chaux pur............	1^{gr}
Phosphate de potasse pur........	0,250
Nitrate de potasse pur...........	0,250
Sulfate d'ammoniaque pur.......	0,250
Eau, jusqu'à..................	1000^{cc}

Du 24 août au 8 octobre, les deux caisses ont été arrosées à cinq reprises chacune avec 1200 centimètres cubes d'eau distillée. Le 8 octobre, les menaces de gelée m'engagent à mettre fin à l'expérience, qui n'a duré que deux mois. La différence apparente entre les deux récoltes porte sur le développement du diamètre de la tige et des feuilles, plus que sur les hauteurs des plants.

Les pieds de maïs, arrachés, pesés et mesurés avec les mêmes soins que les plants de tabac, sont desséchés et analysés; ils donnent les résultats suivants :

	Maïs	
	hors cage.	sous cage.
Hauteur totale..................	$1^m,10$	$0^m,98$
Nombre des feuilles..............	7	7
Poids des pieds, feuilles et tiges.....	86^{gr}	50^{gr}
Circonférence de la tige à $0^m,10$ du collet de la racine..............	$5^c,3$	$4^c,1$

	Tabacs hors cage.	Tabacs sous cage.
Poids de la récolte sèche...........	7gr,922	5gr,428
Taux pour 100 de la substance sèche.	9,21	10,86
Azote pour 100 de la substance sèche.	2,19	1,985
Cendres pour 100 de la subst. sèche..	14,419	19,575

	COMPOSITION IMMÉDIATE DE LA RÉCOLTE			
	Hors cage.		Sous cage.	
	Trouvée.	En cent.	Trouvée.	En cent.
Eau...............	78gr,078	90,78	44gr,572	89,14
Matières azotées.....	1,084	1,26	0,673	1,35
Mat. hydrocarbonées.	5,696	6,63	3,693	7,39
Cendres............	1,142	1,33	1,062	2,12
	86,000	100,00	50,000	100,00

La plante soustraite à l'action de l'électricité atmosphérique a fourni, comparée à l'autre, les taux centésimaux suivants :

	Pour 100.
Matière vivante totale...........	58,14
Matières azotées................	62,08
Substances hydrocarbonées......	64,45
Matières minérales.............	92,99

Malgré l'addition de fumure dans les deux sols, l'écart entre la végétation des deux plants s'est maintenu considérable; c'est d'autant plus frappant, que l'expérience n'a duré que deux mois, et qu'on y a mis fin bien avant que les maïs aient fabriqué toutes les réserves destinées à la floraison et à la fructification.

Troisième expérience (blé de Chiddam). — Le 6 novembre 1877, après avoir bien labouré les deux caisses, on y a semé du blé de Chiddam. La levée s'est faite régulièrement dans les deux caisses, et les plantes se sont comportées sensiblement de la même manière de no-

vembre à fin mars. Le 1er avril 1878, les blés des deux caisses ne présentaient pas, à l'œil, de différences marquées sous le rapport de la hauteur et de la vigueur. On change de nouveau la cage de place et on la reporte sur la caisse B.

Le 25 mai, les tiges de blé mesurent, dans les deux caisses, $0^m,38$ à $0^m,40$ de hauteur, mais le volume apparent des tiges est très-différent; le blé, croissant à l'air libre, a plus de corps et les tiges du blé sous cage sont restées grêles. On coupe dans chaque caisse six tiges de blé au rez du sol, en choisissant autant que possible les tiges qui représentent la croissance moyenne de la récolte de chaque caisse. On prend exactement le poids de ces six tiges; voici les résultats des pesées :

Poids des six tiges hors cage......	$6^{gr},570$
» sous cage......	4,950
Différence en faveur des tiges à l'air libre............	1,620 (30,5 pour 100)

Ainsi, en moins de deux mois, du 1er avril au 25 mai, le blé soustrait à l'influence de l'électricité a produit 75,34 pour 100 seulement du poids de la récolte venue à l'air libre, bien que la faible hauteur des plants ($0^m,40$ au maximum) doive correspondre à des différences de tension électrique très-minimes.

Un accident a empêché de poursuivre jusqu'à l'époque de la maturité les deux expériences comparatives ([1]). Le blé sous cage est demeuré grêle et rabougri ; il a fleuri difficilement, plusieurs fleurs ont avorté, la récolte en grains a été peu abondante. Il serait superflu d'entrer ici dans des détails sur les données numériques de cette expérience, le terme de comparaison (récolte à l'air libre) ayant fait défaut.

([1]) Un chien a mangé, le matin du 2 juin 1878, l'extrémité des pousses des tiges de blé à l'air libre.

B. — *Isolement de la végétation par les arbres.*

Les expériences précédentes m'ont paru assez concluantes pour m'autoriser à attribuer à l'électricité atmosphérique une influence prépondérante sur les phénomènes intimes de la nutrition chez les végétaux, et, dès le mois de juillet dernier, j'eus l'honneur de communiquer à l'Académie des Sciences les résultats que je viens de rapporter ([1]).

Ne pouvant douter que les arbres élevés exercent, sur la végétation placée dans leur voisinage, une action analogue, sinon identique, à celle de la cage de Faraday, je m'expliquais dès lors, beaucoup mieux qu'auparavant, l'action enrayante du couvert des forêts et celle des grands arbres sur la végétation sous-jacente. Bien que cette action me parût hors de doute, considérant, avec M. Thompson, comme absolument nulle la tension électrique sur le sol d'une forêt, je crus utile de faire une expérience directe et de constater l'absence d'électricité sous les arbres de diverses tailles.

Le 2 août 1878, dans un vaste jardin situé dans un faubourg de Nancy et consacré en grande partie à la culture potagère, j'installai, à 10 heures du matin, un électromètre de Thompson, construit par la maison Ruhmkorff, sur les indications de M. E. Mascart. Sous un arbre de 9 mètres de hauteur environ (catalpa) dont le périmètre foliacé mesure 6 à 7 mètres de diamètre, je disposai l'électromètre et ses accessoires. A 5 mètres de l'appareil était placée une lunette à tige munie d'une règle horizontale de $0^m,50$ de longueur, divisée en cinquante parties égales.

L'image de cette règle, reflétée par le miroir de l'élec-

([1]) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, séance du 8 juillet 1878.

tromètre, était suffisamment amplifiée par la lunette pour que l'œil pût apprécier très-aisément la plus légère déviation du miroir.

L'appareil communiquait par des fils conducteurs avec un vase complétement isolé (dispositif E. Mascart) dont on réglait à volonté l'écoulement et le niveau au-dessus du sol. J'ai fait successivement six expériences, dont voici le résumé et les résultats.

Première expérience. — On dispose le vase à écoulement au milieu d'une planche de choux située à 10 mètres environ de l'arbre sous lequel est installé l'électromètre. On place l'orifice du tube sur le sol même, et l'on donne issue à l'eau. L'électromètre n'accuse pas la moindre déviation du miroir. On élève alors le tube d'écoulement à $0^{m},10$ au-dessus du sol; le miroir subit une légère déviation correspondant à une tension appréciable, mais très-faible, étant donnée l'extrême sensibilité de l'appareil. Enfin, on élève le vase à $0^{m},90$ au-dessus du sol et l'on ouvre le robinet; il se produit instantanément une déviation très-rapide du miroir, qui dépasse en quelques secondes le zéro de la règle.

En résumé : à l'air libre, au niveau du sol, tension nulle; à $0^{m},10$, tension très-faible, mais appréciable; à $0^{m},90$, tension relativement considérable.

Deuxième expérience. — On transporte le vase collecteur près du tronc de l'arbre, dans l'espace recouvert par les branches feuillées du catalpa; aux différentes hauteurs comprises entre le sol et la naissance des branches, on n'observe aucune déviation dans le miroir, lors de l'écoulement du liquide; la tension électrique de l'atmosphère est donc nulle sous le catalpa.

Troisième expérience. — Le vase est porté successivement dans diverses régions du périmètre de projection de l'arbre, à une hauteur de $0^{m},90$ au-dessus du sol : nulle part il ne se manifeste la moindre déviation du miroir;

placé successivement à 1 mètre, $1^m,50$ et 2 mètres du périmètre de l'arbre, à l'air libre, le vase collecteur ne transmet aucun courant à l'électromètre.

Quatrième et cinquième expérience. — On porte ensuite le vase à écoulement sous un massif de lilas situé à quelque distance d'un pin sylvestre de 12 à 15 mètres de hauteur, puis sous un berceau de vigne vierge mesurant 4 mètres environ de hauteur : déviation du miroir absolument nulle dans les deux cas.

Sixième expérience. — Enfin, on répète, vers midi, la première expérience faite deux heures auparavant ; on ramène le vase collecteur dans la planche de choux ; on obtient le même résultat que le matin : déviation du miroir très-rapide, allant bien au delà de l'extrémité de la règle graduée. Le 2 août, l'électricité atmosphérique a été constamment positive [1].

De l'ensemble de ces expériences résulte la démonstration d'un certain nombre de faits connus ou prévus, mais qu'il était utile pour moi de vérifier expérimentalement :

1° Les grands arbres, les massifs de verdure, une cage en bois recouverte de plantes vivantes, fonctionnent, à l'égard de la végétation qu'ils dominent, absolument comme une cage métallique : ils soutirent l'électricité atmosphérique et soustraient complétement à son action les objets situés entre eux et le sol.

2° Le périmètre de protection, contre l'influence électrique, d'un arbre de grande taille s'étend au delà de la surface comprise dans la projection verticale de la région foliacée ; l'influence exercée à quelque distance sur la végétation environnante par le voisinage des grands arbres

---

(1) Mon collègue à la Faculté des Sciences, M. Bichat, a bien voulu me prêter son concours pour la réalisation des expériences que je viens de décrire ; je l'en remercie cordialement.

s'explique donc parfaitement (cas des peupliers qui bordent les routes, arbres des vignes, lisière des forêts, clairières des forêts, etc.).

3° Il est possible d'éliminer l'influence de l'électricité atmosphérique sur une plante, dans l'ordre de recherches qui m'occupe, en plaçant cette plante dans le voisinage d'un arbre élevé. Si ce dernier est dépourvu de branches jusqu'à une certaine hauteur, il laissera arriver la lumière directe, la chaleur solaire, la pluie, etc., jusqu'à la plante, qu'il isolera de l'influence de l'électricité atmosphérique, comme la cage dont je me suis servi dans mes essais de culture de 1877.

J'arrive maintenant aux expériences faites en 1878, à la station de Nancy, et à celles que mon ami et ancien collaborateur M. A. Leclerc, directeur du laboratoire de la Société des Agriculteurs de France, a bien voulu instituer cette année à Mettray pour servir de contrôle aux miennes.

C. — *Expériences sous cage et sous marronnier* (1878). — *L'électricité atmosphérique, la floraison et la fructification des plantes.*

Les expériences installées dans le jardin de la station agronomique de l'Est pendant l'été de cette année ont eu pour but principal, outre la vérification des essais de 1877, d'étudier l'influence de l'électricité atmosphérique sur la floraison et sur la fructification des végétaux. Les plantes soumises à l'expérimentation ont été, comme l'année précédente, le tabac et le maïs géant. J'ai choisi, à dessein, deux espèces très-éloignées l'une de l'autre par leur structure, par leurs exigences en matières minérales et par leur richesse très-inégale en azote, afin de pouvoir généraliser les résultats obtenus et les étendre, s'ils étaient concordants, aux végétaux les plus divers.

J'ai en outre institué, dès le printemps, des essais sur les arbres (feuillus et résineux), dont je ne pourrai publier les résultats que dans quelques années, à raison de la lente croissance des essences forestières.

M. Leclerc a, comme moi, expérimenté à Mettray, sous le climat de la Touraine, si différent de celui de la Lorraine, sur le maïs caragua. La parfaite concordance des résultats des quatre séries d'expériences que je vais décrire, la confirmation complète qu'elles m'ont apportée des expériences de l'an dernier ne me semblent laisser aucun doute sur l'importance des phénomènes que j'ai signalés le premier à l'attention des physiologistes.

Les conditions des essais que je vais rapporter ne me paraissent pas laisser de prise à des critiques fondées. On sait d'ailleurs que M. Celi ([1]) a fait, par une méthode toute différente de celle que j'ai imaginée, des expériences dont les résultats confirment entièrement ceux que j'ai communiqués antérieurement à l'Académie des Sciences et dont j'avais, dès l'été de 1877, rendu témoins les personnes qui honoraient de leur visite la Station agronomique de l'Est.

1. *Tabac sous cage dans les cases de végétation.* — J'ai installé, il y a dix ans, dans le jardin de la station, des cases étanches, de 1 mètre en tous les sens, à parois d'ardoise et contenant chacune 1 mètre cube de terre. Ces cases sont drainées; elles sont, de plus, munies de thermomètres placés à $0^m,25$, à $0^m,50$ et à $0^m,75$ au-dessous du niveau supérieur du sol, et se prêtent parfaitement, par leurs dispositions générales, aux recherches physiologiques sur les végétaux.

L'une de ces cases a été affectée, en 1878, aux recherches sur l'influence de l'électricité. Le sol silicéo-calcaire de la case, analysé avant la plantation, présentait la te-

---

([1]) *Voir* les *Annales*, numéro de décembre 1878.

neur suivante en principes nutritifs; il renfermait pour 100 grammes de terre :

Chaux	3gr,44
Acide phosphorique	0,17
Potasse	0,21
Azote organique	0,143210
Azote ammoniacal	0,000397
Azote nitrique	0,004786 (1)

Le 15 mars 1878, on a planté dans cette case deux pieds de tabac provenant de la même couche, ayant même taille, même poids et même vigueur ; dès que la reprise a été assurée, on a recouvert l'un des plants de la cage métallique représentée par la *fig.* 3 (p. 165). Cette cage, formée d'un treillis de fil de fer mince, à mailles de $0^m,10$ sur $0^m,10$, mesure $1^m,60$ de hauteur et $0^m,50$ dans les deux autres dimensions ; elle est terminée, à sa partie supérieure, par quatre gros fils de fer de $0^m,002$ d'épaisseur, dépassant la partie supérieure de la cage d'environ $0^m,25$.

La végétation a parcouru successivement ses diverses phases, la plante sous cage se développant moins que l'autre; la floraison a surtout présenté un grand retard chez ce tabac. Le 23 août, jour de l'arrachage des deux plants, presque toutes les fleurs du tabac à l'air libre étaient épanouies; celles de l'autre pied, beaucoup moins nombreuses, étaient pour la plupart encore en boutons.

La récolte a été pesée, mesurée et analysée comme celle de l'année précédente. Voici les résultats généraux de cet essai :

	Tabacs	
	hors cage.	sous cage.
Hauteur totale de la plante	$1^m,87$	$1^m,42$
Nombre des grandes feuilles	14	13
— des petites feuilles	6	6

(1) C'est le sol de cette case qui a servi aux essais de nitrification exposés plus loin, p. 192 et suiv.

	Tabacs hors cage.	Tabacs sous cage.
Poids des grandes feuilles	410gr	230gr
Poids moyen d'une grande feuille.	30gr,2	25gr,6
Poids des petites feuilles	70gr	70gr
Poids moyen d'une petite feuille..	11gr,7	11gr,7
Diamètre de la tige à 0m,50 de la racine	2c,5	2c
Poids de la tige et des racines (1).	670gr	560gr
Nombre de fleurs	86	45
Poids total de la récolte fraîche...	1150gr	860gr
Poids total de la récolte séchée à 110°	129gr,47	106gr,89

Taux de la substance sèche et des cendres.

Taux pour 100 de la substance sèche ..		11,25	12,43
Taux pour 100 des cendres.	Tiges et côtes sèches.	20,49	22,54
	Feuilles	22,88	22,97

Taux d'azote et de nicotine.

	Pour 100.	Pour 100.
Taux de nicotine des feuilles sèches....	0,57	0,47
Azote pour 100 de la substance sèche..	4,22	3,85
Azote total de la substance sèche......	5gr,464	4gr,115

De l'ensemble de ces chiffres on peut déduire la composition immédiate des deux plants récoltés hors cage et sous cage :

Composition des tabacs (1878).

	Hors cage.	Sous cage.
	gr	gr
Eau................	1020,53	753,11
Mat. sèche...........	129,47	106,89
Récolte totale....	1150,00	860,00

(1) Les racines étaient également bien développées dans les deux plants et pesaient environ 40 grammes.

	Hors cage.	Sous cage.
	gr	gr
Azote (subst. sèche).....	5,464	4,115
Matière azotée correspondante	34,150	25,719
Nicotine pour 100	0,57	0,47
Poids total des cendres...	26gr,52	24gr,076

	Composition immédiate			
	trouvée.	en centièmes.	trouvée.	en centièmes.
	gr		gr	
Eau..............	1020,53	88,74	753,11	87,57
Matières azotées....	34,15	2,97	25,72	2,99
Matières hydrocarbonées............	68,80	5,98	57,09	6,94
Cendres...........	26,52	2,31	24,08	2,80
	1150,00	100,00	860,00	100,00
Nombre des fleurs	89		45	

Le pied de tabac soustrait à l'influence de l'électricité atmosphérique a donc produit, comparé à la récolte fournie par le pied à l'air libre, les taux centésimaux suivants :

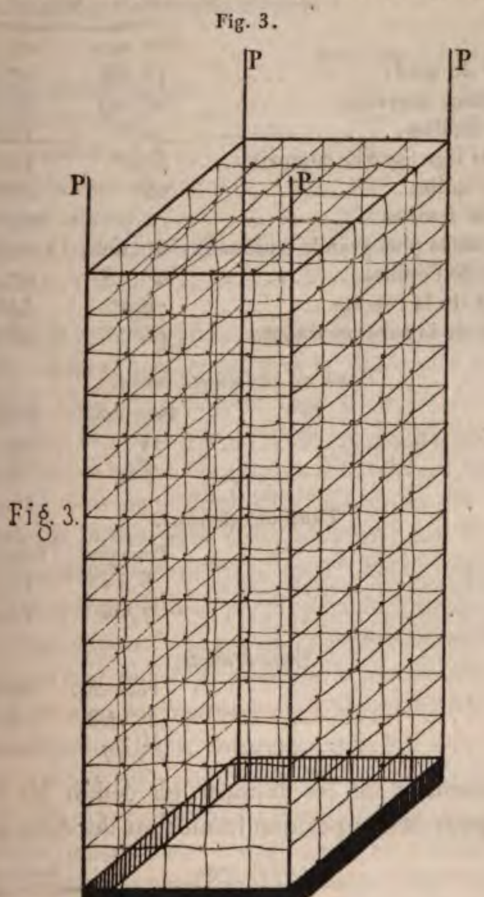
	Hors cage.	Sous cage.
Matière fraîche totale.........	100	73,93
Feuilles....................	100	62,50
Tiges et racines..............	100	83,58
Matières azotées.............	100	75,31
Matières hydrocarbonées......	100	82,97
Cendres...................	100	90,80
Proportion des fleurs.........	100	50,56

La durée de cette expérience a été de cinq mois et huit jours.

2. *Maïs sous cage dans la case de végétation.* — Côte à côte avec les tabacs, on avait planté, le 15 mars, deux pieds de maïs géant provenant du même semis, d'égale venue et pesant chacun un peu moins de 3 grammes.

›rès la reprise, l'un d'eux a été recouvert d'une cage ·étallique de tous points identique à celle du tabac. Les

Fig. 3.



›nditions de sol et de culture ont donc été les mêmes que ·lles des tabacs dont il vient d'être question.

La récolte a eu lieu le 9 septembre 1878, un peu avant floraison du maïs hors cage. La fleur du maïs sous cage, ·aucoup moins développée que l'autre, était encore com- ·étement enfermée dans le cornet terminal.

Voici les résultats des mensurations et des pesées des deux récoltes :

	Maïs	
	hors cage.	sous cage.
Longueur du pied	1m,85	1m,65
Circonférence moyenne	0m,09	0m,065
Poids des feuilles	217gr	132gr
Poids de la tige (spathe compris)	572gr	413gr
Poids de l'épillet	25gr	12gr
Nombre de feuilles	12	12
Longueur de la plus grande feuille	1m,20	1m,10
Longueur de l'épillet	0m,25	0m,12
Poids total de la récolte	789gr	545gr
Poids total de la substance sèche	95gr	65gr,13

Taux de substance sèche.

	Pour 100.	Pour 100.
Feuilles	21	22
Tiges	8,1	8,36

Taux des cendres.

	Pour 100.	Pour 100.
Feuilles	8,11	10,41
Tiges	7,65	10,20

Taux d'azote.

	Pour 100.	Pour 100.
Feuilles	2,963	2,765
Tiges	2,07	1,48

De l'ensemble de ces données, on déduit les nombres suivants pour la composition immédiate des deux maïs :

	Hors cage.		Sous cage.	
	Trouvée.	En cent.	Trouvée.	En cent.
Eau	693gr,470	87,89	479gr,870	88,05
Matières azotées	15,219	1,93	8,562	1,57
Matières hydrocarbonées	72,768	9,22	49,859	9,15
Cendres	7,543	0,96	6,709	1,23
	789,000	100,00	545,000	100,00

Le plant de maïs soustrait à l'influence de l'électricité atmosphérique a produit, comparé au maïs végétant à l'air libre, les taux centésimaux suivants :

	Hors cage.	Sous cage.
Matière fraîche totale.........	100	69,07
Feuilles.......	100	60,80
Tige et racines	100	72,20
Fleurs.....................	100	48,00
Matières azotées.............	100	56,26
Matières hydrocarbonées......	100	68,71
Cendres	100	88,94

La durée de cette expérience a été de cinq mois et vingt-cinq jours. Je ferai remarquer que la différence des résultats obtenus sous cage et hors cage dans les deux séries d'essais (tabac et maïs) que je viens de rapporter est plutôt un minimum qu'un maximum. En effet, il serait possible que le voisinage immédiat des cages eût diminué l'influence de l'électricité atmosphérique sur les plantes élevées comparativement hors cage. Au printemps prochain, j'entreprendrai une série spéciale d'essais pour déterminer directement s'il y a ou non protection des objets environnants par une cage isolante à parois verticales.

3. *Tabacs sous marronnier.* — L'absence totale de tension électrique de l'air, constatée sous les arbres par les essais du 2 août, m'a conduit à démontrer expérimentalement qu'un arbre isole aussi complétement la végétation sous-jacente qu'une cage métallique. Je n'avais pas attendu ce résultat prévu pour instituer des expériences comparatives sur les végétaux. Le 3 avril 1878, c'est-à-dire quinze jours après le commencement des essais dans la case de végétation sur le tabac et sur le maïs, je plaçai dans trois pots en terre cuite, contenant 15 à 16 kilogrammes de terre de jardin [1], trois plants de tabac provenant de la

[1] Quantité de terre minime. Ainsi peut s'expliquer la faiblesse de poids de toutes les récoltes.

même couche que les précédents et tout à fait comparables sous le rapport du poids, de la vigueur et du développement (quatre feuilles primordiales). La reprise était complète le 22 du même mois. On porta ces trois pots dans la partie la mieux aérée et la plus éclairée du jardin, et on les plaça de façon qu'ils reçussent le soleil depuis le matin jusqu'au soir. L'un d'eux (n° 1) resta à l'air libre sans abri; le second (n° 2) fut déposé à 1 mètre environ du premier et recouvert d'une cage semblable à celle décrite précédemment (*fig.* 3); enfin le troisième (n° 3) fut installé au pied d'un jeune marronnier très-peu feuillu, d'une hauteur de fût de 5 mètres environ, n'empêchant ni la lumière directe du soleil, ni l'air, ni la pluie, d'arriver au jeune plant.

Pendant les premiers temps, les différences notées périodiquement dans le développement des trois plants étaient peu sensibles; elles s'accentuèrent rapidement lorsque les tabacs eurent acquis $0^m,60$ à $0^m,70$ de hauteur. C'est dans la période qui a précédé immédiatement, pour chacun des plants à des époques différentes, la formation et l'épanouissement des organes floraux, que l'élongation des tiges donna lieu aux accroissements les plus rapides, comme le montre le tableau suivant, extrait du registre d'observations :

Hauteur des plants à diverses époques et nombre des fleurs.

	Hors cage.	Sous cage.	Sous marronnier.
	m	m	m
20 août 1878....	1,12 (1 fleur.)	0,78 (pas de fleur.)	0,88 (pas de fl[illegible]
27 août.........	1,20 (12 fleurs.)	0,95 (1 bouton.)	1,05 (1 bouton.)
31 août.........	1,20 (32 fleurs.)	1,10 (1 fleur.)	1,15 (1 fleur.)
7 septembre....	1,30 (48 fleurs ou boutons.)	1,25 (28 fleurs ou boutons.)	1,30 (29 fleurs ou boutons.)

Le 25 septembre, la plupart des capsules sont bien formées, mais les feuilles commencent à se dessécher, et, la température extérieure devenant assez froide, les trois plants sont portés dans la salle de végétation de la station,

où la maturation s'achève, pour tous les trois, à l'abri de l'influence de l'électricité.

Dans le commencement d'octobre, les capsules sont mûres, elles ont pris la teinte brunâtre caractéristique, les plants sont presque entièrement desséchés ; on détache avec soin les capsules mûres des trois plants.

Le tabac hors cage donne.......	41	capsules mûres.
» sous cage donne.......	20	»
» sous marronnier donne.	20	»

On brise les capsules, on réunit la semence obtenue dans chaque récolte et on la pèse ; on obtient ainsi les poids ci-dessous :

	Hors cage.	Sous cage.	Sous marronnier.
Graine....	4gr,020	2gr,860	2gr,510

Ces graines seront semées l'an prochain.

On procède ensuite à la pesée et à l'analyse des trois récoltes, ce qui donne les résultats suivants :

	Tabacs		
	1. hors cage.	2. sous cage.	3. sous marronnier.
	gr	gr	gr
Eau...........	385,93	276,67	248,99
Tiges sèches....	25,50	25,50	21,50
Feuilles sèches..	15,50	9,00	9,50
Graines........	4,02	2,86	2,51
Capsules vides...	3,90	1,84	1,80
	434,85	315,87	284,30

J'ai dosé l'azote dans la matière sèche des tiges, des feuilles et des graines. Voici les taux constatés dans les trois tabacs :

Azote pour 100 *de substance sèche :*

	Tabacs		
	hors cage.	sous cage.	sous marronnier.
	gr	gr	gr
Feuilles.........	1,45	1,62	1,62
Tiges...........	0,69	0,77	0,77
Graines.........	3,574	3,404	3,44

Quantités totales d'azote assimilé :

	Tabacs		
	hors cage.	sous cage.	sous marronnier.
	gr	gr	gr
Feuilles...........	0,281	0,176	0,183
Tiges..............	0,170	0,196	0,165
Graines...........	0,144	0,097	0,085
	0,601	0,469	0,433

Les feuilles et les tiges sèches, incinérées isolément, ont donné les taux pour 100 suivants de cendres :

	Hors cage.	Sous cage.	Sous marronnier.
	gr	gr	gr
Tiges.............	7,70	8,20	8,34
Feuilles...........	19,70	18,36	18,58

La composition immédiate des trois récoltes, déterminée par le rapprochement des nombres ci-dessus, est la suivante :

	TABACS					
	hors cage.		sous cage.		sous marronni	
	Trouvée.	En cent.	Trouvée.	En cent.	Trouvée.	En c
	gr		gr		gr	
Eau...............	385,930	88,750	276,670	87,590	248,990	87,
Matières azotées....	3,756	0,863	2,931	0,928	2,706	0,
Mat. hydrocarbon..	39,261	9,029	32,102	10,163	28,637	10,
Cendres...........	5,903	1,358	4,167	1,319	3,967	1,
Totaux.......	434,850	100,000	315,870	100,000	284,300	100,

Le fait qui frappe tout d'abord dans la comparaison de ces nombres, c'est l'action identique exercée sur les plants par la cage métallique et par l'arbre.

Le tabac placé sous le marronnier a été tout aussi complétement soustrait à l'action électrique de l'air que le plant sous cage métallique.

L'influence sur la fructification est des plus nettes aussi : dans les deux cas, diminution de moitié dans le nombre des capsules, et réduction de 25 à 30 pour 100 dans le poids des graines.

De plus, le taux d'azote des graines est un peu plus faible pour les tabacs soustraits à l'électricité atmosphériques, ce qui m'a paru tenir à la présence de graines avortées dans les deux récoltes *sous cage* et *sous marronnier*.

Les plants de tabacs soustraits à l'influence de l'électricité atmosphérique ont produit, comparativement avec le plant à l'air libre, les taux centésimaux suivants :

	Hors cage.	Sous cage.	Sous marronnier.
	gr	gr	gr
Matière fraîche totale....	100	72,64	65,38
Feuilles..............	100	56,60	59,75
Tiges................	100	100,00	86,00
Nombre de capsules....	100	48,78	48,78
Graines..............	100	71,15	62,44
Matières azotées........	100	78,03	72,04
Matières hydrocarbonées.	100	81,74	72,94
Cendres..............	100	70,59	67,20

Ces essais, commencés le 3 avril 1878 et terminés le 15 octobre, ont duré un peu plus de six mois.

Je vais exposer maintenant les expériences que M. A. Leclerc a bien voulu faire à Mettray pour contrôler mes essais, puis je reviendrai sur l'ensemble des expériences pour en rapprocher les résultats et en tirer quelques conclusions qui me paraissent intéresser à la fois la Physiologie, la Physique générale et l'Agriculture.

Je laisse également de côté, pour l'instant, l'analyse des cendres des végétaux hors cage et sous cage ; je consacrerai à leur examen un paragraphe spécial, après avoir décrit les essais de Mettray.

D. — *Expériences de Mettray* (Maïs sous cage.)

M. A. Leclerc a adopté pour cet essai des dispositions générales qui, ne s'écartant de celles que j'ai décrites pré-

cédemment sur aucun point important, rendent les résultats obtenus à Mettray tout à fait comparables avec ceux qu'ont fournis les expériences de la Station agronomique de l'Est.

Deux caisses en tôle, étanches, d'une surface de 1 mètre carré et d'une profondeur de $0^m,25$, sont, le 21 mai 1878, enfouies dans le sol, afin d'éviter les variations de température dues aux parois métalliques. On verse, dans chacune d'elles, 258 kilogrammes de terre homogène passée au tamis de 1 millimètre. Cette terre, analysée au commencement de l'expérience, présentait la composition centésimale suivante :

	gr
Silice soluble	0,135
Oxyde de fer et alumine	3,586
Chaux	0,739
Magnésie	0,060
Soude	0,042
Potasse	0,132
Acide sulfurique	0,151
Chlore	traces
Acide phosphorique	0,108
Azote total	0,128
Sable et matières non dosées	94,919
	100,000

L'azote existe sous les trois états dans le sol et s'y trouve dans les proportions suivantes, pour 100 grammes de terre :

	gr
Azote organique	0,122304
Azote ammoniacal	0,000420
Azote nitrique	0,005559
Azote total	0,128283

Après avoir arrosé le sol des deux caisses avec de l'eau distillée, on plante dans chaque caisse, sur sept rangs,

49 grains de maïs caragua préalablement germés hors des caisses.

Lorsque les maïs repris mesuraient de $0^m,08$ à $0^m,10$ de hauteur, on a recouvert l'une des caisses d'une cage de $2^m,50$ de hauteur, formée d'un treillis de fil de fer fin à mailles de $0^m,08$ de largeur. La partie inférieure de cette cage communiquait avec les parois de la caisse et avec le sol, comme dans les essais de Nancy en 1877 (*voir* p. 151). L'autre caisse est restée découverte.

42 maïs se sont développés dans la cage à l'air libre.

40 seulement dans celle qui était surmontée de la cage.

La végétation suivit régulièrement son cours dans les deux caisses, quoique beaucoup moins développée sous cage qu'à l'air libre.

Le 21 septembre, c'est-à-dire après quatre mois, on mit fin à l'expérience ; les maïs furent arrachés avec soin, mesurés, pesés et analysés.

Pendant le cours de l'essai, M. Leclerc avait tenu note de la marche de la floraison.

Voici d'abord les résultats généraux de cette expérience :

	Hors cage.	Sous cage.
Tiges ou pieds n'ayant pas produit de fleur mâle	5	14
Tiges ayant produit la fleur mâle.	37	26
Tiges ayant produit un épi femelle apparent	4	2
Hauteur du pied le plus grand	$2^m,47$	$2^m,23$
Hauteur moyenne d'un pied	$1^m,69$	$1^m,51$
Hauteur du pied le plus petit	$1^m,33$	$0^m,20$
Diamètre maximum du pied à la base	25^{mm} et 27^{mm}	21^{mm}
Diamètre minimum du pied à la base	14^{mm}	7^{mm}
Poids total des feuilles et tiges	$11^{kg},578$	$8^{kg},521$

	Hors cage.	Sous cage.
Substances sèches, feuilles et tiges.	2kg,642	1kg,839
» racines.......	531gr,2	391gr,2
Azote total de la récolte.........	25gr,984	21gr,682
Taux pour 100 d'azote..........	0,98	1,18
Cendres de la récolte (feuilles et tiges).....................	213gr,3	168gr,1
Taux pour 100 de substance sèche.....................	22,82	21,58
Taux pour 100 de cendres.......	8,07	9,14

Calculée d'après ces données, la composition immédiate des récoltes est la suivante :

	Hors cage.		Sous cage.	
	Trouvée.	En cent.	Trouvée.	En cent.
	kg		kg	
Eau.............	8,936	77,18	6,682	78,41
Matières azotées...	0,162	1,40	0,135	1,59
Matières hydrocarb.	2,267	19,58	1,536	18,03
Cendres..........	0,213	1,84	0,168	1,97
	11,578	100,00	8,521	100,00

Les produits récoltés *hors cage* étant pris pour unité, la plante *sous cage* a donné les rendements centésimaux suivants :

	Hors cage.	Sous cage.
Matière fraîche totale (feuilles et tiges)...	100	73,59
Racines............................	100	73,63
Fleurs.............................	100	68,29
Matières azotées....................	100	88,33
Matières hydrocarbonées..............	100	67,75
Cendres...........................	100	78,87

Il n'est pas sans intérêt de comparer la valeur nutritive des deux maïs; l'analyse immédiate que M. Leclerc a faite des tiges sèches permet cette comparaison.

	Hors cage.	Sous cage.
Cellulose...........	17,407	23,78
Matières grasses.....	1,950	1,99
Matières azotées.....	6,059	7,2732
Amidon	66,514	57,848
Cendres............	8,070	9,140
	100,000	100,000
Rapport nutritif ...	$\frac{1}{11,29}$	$\frac{1}{8,22}$

Les taux des divers principes immédiats élaborés par la plante dans les deux cas sont dans les rapports suivants :

	Hors cage.	Sous cage.
Cellulose...............	100	136,62
Matières grasses.........	100	102,05
Matières azotées.........	100	120,02
Amidon, sucre, etc......	100	86,92

La plante sous cage a donc élaboré, toutes proportions gardées, plus de cellulose, de matières grasses et de matières azotées que la plante à l'air libre, et moins d'amidon ou de sucre que cette dernière. Mais, si l'on compare entre elles les sommes des hydrocarbures produits (cellulose + graisse + amidon), le total des matières hydrocarbonées fabriquées par les deux plantes est plus élevé dans le maïs à l'air libre que dans le maïs sous cage, dans le rapport de 100 à 97,34, soit de 3 pour 100 environ. Je reviendrai plus tard sur ces relations.

E. — *Récapitulation des essais de culture de Nancy et de Mettray.*

Avant d'examiner l'influence exercée par l'électricité atmosphérique sur la composition élémentaire des récoltes et sur la répartition des principes minéraux dans les cendres qu'elles ont fournies, je crois utile de rappeler,

sous une forme synthétique, les résultats obtenus, en 1877 et en 1878, dans les expériences que je viens de décrire.

Trois essais ont porté sur le tabac, trois sur le maïs caragua, un sur le blé. Je négligerai ce dernier, qui est resté incomplet par suite d'un accident, pour ne m'occuper que des deux premières séries d'expériences.

Les taux moyens de substance sèche, d'azote et de cendres des trois essais de culture du tabac sont les suivants :

	Hors cage.	Sous cage.	Diff.
Taux moyen. de subst. sèche..	11,16	12,44	— 1,28
Taux moyen d'azote pour 100 de subst. sèche...........	2,29	2,23	+ 0,06
Taux moyen de cendres pour 100 de subst. sèche.......	12,84	14,90	— 2,14

Pour les trois essais sur le maïs, voici les taux moyens obtenus :

	Hors cage.	Sous cage.	Diff.
Taux moyen de subst. sèche...	14,72	14,80	— 0,08
Taux moyen d'azote	2,05	1,98	+ 0,07
Taux moyen de cendres.......	10,12	13,01	— 2,89

Enfin, la moyenne calculée d'après les résultats des six analyses (tabac et maïs réunis) donne :

	Hors cage.	Sous cage.	Diff.
Taux moyen de subst. sèche...	12,94	13,62	— 0,68
Taux moyen d'azote.........	2,17	2,11	+ 0,06
Taux moyen de cendres......	11,48	13,95	— 2,47

Si maintenant on fait la somme des produits azotés, hydrocarbonés, et des matières minérales enlevés au sol par les deux séries de récolte, on trouve, pour la production totale, les nombres suivants :

	Hors cage.	Sous cage.	Rapport des produits sous cage aux produits hors cage, pour 100.
	gr	gr	
Matières azotées....	218,5	174,2	79,72
Matières hydrocarb.	2479,0	1692,0	68,25
Matières minérales..	257,0	210,4	81,87
Subst. sèche totale.	2954,5	2076,6	70,29
Eau	11356,4	8358,0	
Récolte totale....	14kg,311	10kg,435	72,91

Ces résultats numériques peuvent se traduire en quelques propositions qui les rendront plus faciles à saisir :

1° Les végétaux sur lesquels ont porté mes expériences (tabac et maïs géant) ont été notablement influencés dans leur accroissement par la suppression de tension électrique dans l'atmosphère qui les entourait.

La proportion de tissus vivants formés en l'absence de l'action de l'électricité atmosphérique a été inférieure de 27,09 pour 100 à la production normale.

2° Le taux des matières sèches élaborées par la plante s'est abaissé, sous cage, de 29,71 pour 100; celui des matières azotées, de 20,28 pour 100; le taux des matières amylacées (sucre, amidon, etc.) a été particulièrement influencé par la suppression de l'état électrique de l'air : il s'est abaissé de 31,75 pour 100 sous cage.

3° Les plantes végétant à l'air libre ont absorbé d'une manière absolue un peu plus d'azote, 0,06 pour 100, et beaucoup moins de matières minérales.

Ce fait constant, dans toutes mes cultures sous cage, d'une élévation dans le taux des cendres paraît d'autant plus singulier, au premier abord, que, suivant toute probabilité, comme on le verra plus loin, l'électricité atmosphé-

rique favorise l'évaporation et, par conséquent, le passage d'un plus grand volume d'eau au travers des tissus de la plante pendant son développement. Je crois qu'il s'explique cependant d'une façon satisfaisante si l'on réfléchit que : 1° les racines se développent également dans les végétaux hors cage et sous cage; leur poids est resté, dans tous mes essais, exactement proportionnel à celui de la récolte, tandis que le poids des feuilles, rapporté à la récolte totale, est notablement inférieur dans la plante privée d'électricité; 2° l'atténuation dans la marche de la végétation sous cage porte principalement sur la production moindre d'amidon, de glucose, etc.; les deux plantes absorbant les mêmes quantités de matières minérales, mais fabriquant à leur aide des poids très-inégaux de matière verte (tiges et feuilles), le taux des cendres, dans ces dernières, doit être plus élevé chez la plante qui produit le moins de tissus verts, la quantité de principes minéraux correspondant, dans ce cas, à un poids plus élevé de substance sèche.

J'appelle tout particulièrement l'attention des physiciens sur la relation que j'ai constatée entre les taux de substance verte et de matières minérales élaborées par les végétaux et l'état électrique de l'atmosphère à des altitudes différentes. Les observations faites dans les stations forestières bavaroises ont mis en relief deux faits fort intéressants : les variations inverses dans les dimensions des feuilles de la même essence et dans le taux de leurs cendres, avec les altitudes auxquelles croissent les arbres.

Les deux Tableaux suivants donnent une idée des différences dans les dimensions des feuilles et des variations dans le taux des cendres [1] :

---

[1] *La statique chimique des forêts* (*Annales de la station agronomique de l'Est*, p. 157 et suiv., in-8°. Librairie agricole de la Maison rustique; 1878).

1. *Dimensions des feuilles de hêtre.*

Localités.	Hauteur au-dessus du niveau de la mer.	Surface totale de 1000 feuilles en mèt. car.
	m	mq
Aschaffenbourg	133	3,414
Odenwald	237	2,128
Guttenbergerwald	324	2,112
Id.	438	1,822
Buchberg	500	1,843
Melibocus (Odenwald)	514	1,674
Unterhuttenwald	685	1,500
Blasslberg	700	1,472
Hexenriegel	1043	1,083
Tummelplatz	1182	1,351
Lusengipfel, limite sup. du hêtre.	1344	0,910

Les écarts entre les altitudes extrêmes (1344 et 133 mètres) sont donc de 63 pour 100 en faveur de l'altitude la plus faible.

Les divergences dans les taux de matières minérales absorbées par les feuilles des mêmes essences à diverses hauteurs ne sont pas moins frappantes :

2. *Taux des cendres.*

Hêtre.		Epicéa.		Mélèze.	
Altitude.	Taux pour 100 de cendres.	Altitude.	Taux pour 100 de cendres.	Altitude.	Taux pour 100 de cendres.
m		m		m	
1344	3,94	1110	3,58	1068	2,49
685	5,52	915	5,43	880	2,77
324	6,70	730	6,25	476	3,57
237	6,97	130	10,19	171	6,02

Le même fait a été constaté pour les prairies; l'herbe des pâturages élevés laisse 2,91 pour 100 de cendres seu-

lement, tandis que celle des prairies basses donne, en moyenne, 6,02 de résidu incombustible. N'y aurait-il pas entre ces faits et la diminution progressive de la quantité d'électricité atmosphérique, à mesure qu'on descend dans les plaines, une étroite connexité? C'est à la mesure directe de l'électricité atmosphérique dans les diverses régions de l'atmosphère à nous donner la réponse à cette question (¹).

Ne serait-ce pas aussi à des conditions de cet ordre que seraient dus, au moins pour une part, les curieux phénomènes étudiés par MM. Schubeler, E. Tisserand et A. Petermann, sur la végétation et la précocité des récoltes en Norvége et dans les pays du nord de l'Europe (²)? Autant de sujets très-dignes de fixer l'attention des savants qui s'occupent plus particulièrement des grands problèmes de la Physique du globe.

F. — *Composition élémentaire des maïs cultivés hors cage et sous cage.*

M. A. Leclerc a soumis à l'analyse élémentaire les deux récoltes de maïs obtenues par lui sous cage et hors cage : il a successivement analysé les fleurs, feuilles et tiges réunies, et les racines; enfin, il a recherché dans la partie aérienne des récoltes les quantités d'acide nitrique et d'ammoniaque tout formés qu'elles contenaient. Voici les résultats de cet intéressant travail :

(¹) L'électromètre enregistreur de M. A. Redier permettra sans doute de résoudre cet intéressant problème de la constitution électrique de l'air à diverses altitudes.

(²) *Mémoire sur la végétation dans les hautes latitudes*, par M. E. Tisserand, Directeur de l'Institut national agronomique; Paris, 1876. *Recherches sur les graines originaires des hautes latitudes*, par M. A. Petermann, Directeur de la Station agricole de Gembloux; Bruxelles, 1877.

Composition élémentaire des tiges, feuilles et fleurs.

	En centièmes.	
	Hors cage.	Sous cage.
	gr	gr
Carbone	42,290	43,511
Hydrogène	6,369	5,974
Azote	0,983	1,179
Oxygène	42,101	41,489
Matières minérales (1)	8,257	7,847
	100,000	100,000

	Pour toute la récolte.	
	Hors cage.	Sous cage.
	gr	gr
Carbone	1117,531	800,306
Hydrogène	168,310	109,882
Azote	25,984	21,682
Oxygène	1112,517	763,114
Matières minérales	213,300	168,100
	2637,642	1862,884

Le dosage de l'azote nitrique et de l'azote ammoniacal a donné pour toute la récolte les résultats suivants :

	Hors cage.	Sous cage.
	gr	gr
Azote nitrique	0,051	0,032
Azote ammoniacal	0,315	0,249
Azote organique	25,618	21,401
Azote total	25,984	21,682

Après avoir débarrassé aussi bien que possible les racines extraites du sol de la terre qui y adhérait, et avoir réuni, par le tamisage du sol, les fragments qu'on n'avait pu arracher du premier coup, on les a lavées complétement,

(1) Déduction faite de CO^2.

(opération qui a dû leur faire perdre une partie de leurs matières minérales solubles), puis desséchées et pesées. Les racines des plantes hors cage pesaient, séchées, 591^gr^,019; celles des plantes sous cage, 391^gr^,785. Voici les résultats de leur combustion :

	En centièmes.	
	Hors cage.	Sous cage.
	gr	gr
Carbone	45,09	45,18
Hydrogène	5,45	5,80
Azote	2,85	2,01
Oxygène	39,71	39,73
Matières minérales	6,90	7,28
	100,00	100,00

	Récolte totale.	
	Hors cage.	Sous cage.
	gr	gr
Carbone	239,437	177,008
Hydrogène	28,940	22,723
Azote	15,134	7,875
Oxygène	210,868	155,656
Matières minérales	36,640	28,522
	531,019	391,784

En rapprochant ces nombres, on obtient pour la composition élémentaire des deux récoltes sèches les résultats généraux suivants :

	Hors cage.				
	Tiges, feuilles, fleurs.		Racines.		Total.
	gr		gr		gr
Carbone	1117,531	+	239,437	=	1356,968
Hydrogène	168,310	+	28,940	=	197,250
Azote	25,984	+	15,134	=	41,118
Oxygène	1112,517	+	210,868	=	1323,385
Matières minérales	213,300	+	36,640	=	249,940
			Récolte totale	=	3168,661

	Sous cage.				
	Tiges, feuilles, fleurs.		Racines.		Total.
	gr		gr		gr
Carbone	800,306	+	177,008	=	977,314
Hydrogène	109,882	+	22,723	=	132,605
Azote	21,682	+	7,875	=	29,557
Oxygène	763,114	+	155,656	=	918,770
Matières minérales....	168,100	+	28,522	=	196,622
			Récolte totale	=	2254,868

L'ensemble de ces résultats concorde tout à fait avec les analyses immédiates sommaires que j'ai données précédemment et auxquelles j'ai été contraint de me borner dans mes essais de culture de 1877 et de 1878, le temps m'ayant fait défaut pour effectuer les nombreuses analyses élémentaires qu'ils auraient comportées. Je suis donc doublement reconnaissant à mon ami et ancien élève, M. Leclerc, d'avoir bien voulu me fournir tous les chiffres qui précèdent.

Si l'on compare entre elles les quantités de carbone, d'hydrogène, d'azote, d'oxygène et de matières minérales contenues dans chacune des récoltes, en prenant pour unité la récolte hors cage, on voit plus nettement encore la concordance frappante des résultats de l'analyse immédiate et de l'analyse élémentaire.

Pour 100 de chacun des éléments fixés par la récolte hors cage, la récolte sous cage a donné les proportions suivantes :

	Tiges.	Racines.	Tiges et racines.	Récolte totale.
Carbone	71,6	73,9	72,0	71,21 pour 100
Hydrogène	65,2	78,5	67,2	
Azote	83,0	52,0	71,8	
Oxygène	68,5	73,8	69,4	
Matières minérales..	78,7	77,8	78,7	

De l'ensemble de cette longue série de chiffres résulte donc, comme des analyses immédiates qui précèdent, la démonstration évidente de l'action enrayante exercée sur l'assimilation organique par la suppression de l'état électrique de l'air, réservoir de l'acide carbonique, de l'eau et de l'ammoniaque qui constituent les aliments aériens de la plante.

Pour compléter l'examen des récoltes fournies par les expériences de 1877 et de 1878, il me reste à faire connaître la composition des cendres de ces récoltes.

G. — *Composition des cendres des récoltes hors cage et sous cage.*

Nous avons vu précédemment que le taux des cendres laissées par la substance sèche est constamment plus élevé dans les plantes qui ont végété à l'abri de l'influence de l'électricité que dans celles venues à l'air libre. Il m'a paru intéressant de rechercher si la nature et la quantité de chacun des principes minéraux qui constituent les cendres variaient également dans ces deux conditions. En attendant que les essais de l'année prochaine me permettent de formuler des conclusions certaines à ce sujet, je crois utile de résumer mes analyses et celles de M. Leclerc. L'examen des chiffres qu'elles nous ont donnés montre combien, lorsqu'on publie des analyses de ce genre, il est important de préciser l'époque de la végétation à laquelle on a choisi la plante pour y doser les matières minérales, le taux de chacun des principes incombustibles variant dans des proportions énormes, avec l'âge de la plante. Aussi est-ce à titre de renseignements, en attendant les expériences que je prépare pour l'année prochaine, que je crois devoir donner dès à présent les résultats de nos analyses, sans méconnaître la nécessité d'une étude plus complète à ce sujet, avant d'en tirer des conclusions définitives.

TABACS.

1° *Composition des cendres de tabac* (cases de végétation).
Feuilles récoltées en pleine floraison.

	Hors cage.	Sous cage.
Silice	5,48	5,37
Acide sulfurique	7,73	7,91
Acide phosphorique	7,87	6,56
Chlore	1,40	1,80
Chaux	51,75	54,33
Magnésie	5,77	3,13
Potasse	12,94	14,32
Soude	2,14	2,39
Oxyde de fer et de manganèse	4,92	4,18
	100,00	100,00
A déduire oxygène correspondant au chlore	0,31	0,40
Différence	99,69	99,60

Tiges des mêmes plants (1).

	Hors cage.	Sous cage.
Chaux	25,74	27,28
Potasse	2,83	3,44
Acide phosphorique	2,48	4,21

La comparaison de la composition des cendres, des tiges et des feuilles, montre que la végétation était moins avancée sous cage que hors cage, les éléments fondamentaux (potasse et acide phosphorique) étant relativement plus abondants dans les tiges du pied sous cage que dans celles du plant à l'air libre, et la migration qui s'accomplit au moment de la floraison étant plus avancée hors cage.

(1) On s'est borné à doser les trois éléments les plus importants.

2° *Composition des cendres des tiges des trois tabacs. — Hors cage, sous cage et sous marronnier* (page 167) ([1]).

	Hors cage.	Sous cage.	Sous marronnier.
Chaux	7,12	7,81	8,03
Magnésie	2,87	1,19	1,32
Potasse	42,20	39,78	38,18
Soude	7,62	5,36	3,81
Acide phosphorique	8,25	8,90	9,39
Oxyde de fer	4,12	5,17	5,63

La grande analogie de la composition des cendres sous cage et sous marronnier montre une fois de plus l'identité d'action de l'arbre et de la cage.

La maturité de la plante est complète; la plus grande partie des alcalis des feuilles s'est concentrée dans la tige.

MAÏS.

1° *Récolte du 9 septembre dans les cases de végétation (feuilles)*.

	Hors cage.	Sous cage.
Silice	37,11	41,20
Acide sulfurique	3,09	4,52
Acide phosphorique	10,31	7,03
Chlore	3,35	4,52
Chaux	12,37	12,06
Magnésie	3,87	3,01
Potasse	25,26	23,12
Soude	0,52	2,01
Oxyde de fer et manganèse.	4,12	2,53
	100,00	100,00
A retrancher pour chlore.	0,74	1,01
	99,26	98,99

([1]) Les analyses des cendres des feuilles n'ont pu être faites faute de matériaux suffisants.

2° *Composition des cendres des maïs* (Mettray).

	Tiges, feuilles et fleurs réunies.		Racines.	
	Hors cage.	Sous cage.	Hors cage.	Sous cage.
Silice	40,020	38,222	61,449	50,210
Acide sulfurique.	traces	traces	5,295	6,857
Acide phosphor.	4,896	4,952	4,554	4,501
Chlore	8,939	11,387	4,699	3,904
Chaux..	6,823	6,819	12,940	10,487
Magnésie......	1,848	1,945	1,265	1,048
Potasse........	34,623	25,536	2,169	12,133
Soude.........	0,000	8,497	2,060	5,889
Alumine.......	2,353	2,117	5,566	4,969
Sesquiox. de fer.	0,498	0,525		
	100,000	100,000	100,000	100,000

La différence qualitative la plus frappante entre les cendres des maïs et des tabacs hors cage et sous cage porte assurément sur la soude. Les cendres du maïs hors cage de l'essai de Nancy ne contiennent que 0,52 pour 100 de soude, au lieu de 2,01 sous cage. M. Leclerc n'a pas trouvé trace de soude dans les cendres de son maïs hors cage, tandis que celles du maïs sous cage en contenaient 8,5 pour 100. L'électricité atmosphérique s'opposerait-elle à l'absorption de la soude chez le maïs? Cela serait bien singulier. Le fait de l'absence de soude, constaté avec tous les soins possibles par M. Leclerc, mérite d'être noté, sauf vérification ultérieure. En dehors de ce point intéressant, les analyses faites à Mettray ont révélé d'une façon incontestable la présence, en proportion notable, de l'alumine dans les cendres du maïs; ce fait, absolument nouveau, a été mis hors de doute par M. Leclerc, qui a isolé et purifié l'alumine, afin d'en constater tous les caractères. Je lui laisserai le soin d'étendre cette étude à d'autres végétaux, la chose méritant d'être étudiée complétement, la présence

de l'alumine dans les cendres des végétaux autres que la vigne étant contestée jusqu'à ce jour. On sait, par les essais de culture dans l'eau, que l'oxyde d'aluminium n'est pas indispensable au développement complet d'une plante, mais il se pourrait que l'alumine jouât un rôle jusqu'ici méconnu.

La comparaison du taux de chacun des principes minéraux qui constituent les cendres des végétaux hors cage et sous cage montre que l'électricité atmosphérique exerce une action sur l'assimilation plus ou moins active de chacun d'eux; mais j'attendrai les récoltes de l'année prochaine pour élucider, s'il est possible, les conditions qui favorisent ou retardent l'assimilation de la potasse, de la soude, de la chaux et de l'acide phosphorique, par les plantes soumises ou soustraites à l'action de l'électricité atmosphérique.

II. — L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE, LA NITRIFICATION DU SOL ET L'ASSIMILATION DE L'AMMONIAQUE DE L'AIR PAR LES PLANTES.

Les beaux travaux de M. Boussingault et de M. Schlœsing sur l'importante question de la nitrification du sol peuvent se résumer en quelques propositions qui ne laissent aucun doute sur le sens exact à attribuer, dans l'état de nos connaissances, au terme *nitrification du sol*.

La nitrification, c'est-à-dire la transformation de l'azote en nitrate, s'effectue *exclusivement* aux dépens de l'azote engagé dans les combinaisons organiques que renferme le sol. L'azote gazeux de l'air ou du sol n'y prend aucune part. La prétendue transformation de la matière cellulosique et du glucose sous l'influence des alcalis n'existe pas; lorsque l'on emploie du glucose pur et de la soude exempte de nitrate, on n'obtient pas trace d'azote fixé par l'élément hydrocarboné.

Bien plus, la nitrification a toujours lieu avec perte d'une partie de l'azote des matières organiques qui nitrifient. De l'azote de ces matières il se fait trois parts durant la nitrification : 1° une partie de l'azote organique passe à l'état d'acide nitrique; 2° une autre se transforme en ammoniaque; 3° le reste se dégage à l'état d'azote gazeux. Il résulte de là que le phénomène de la nitrification, si important pour la nutrition des plantes qui végètent dans le sol où il se produit, ne constitue en aucune façon un enrichissement réel en substances protéiques, une source de matières azotées, mais qu'il est accompagné, au contraire, d'une *perte constante* d'azote engagé dans les combinaisons organiques sous l'influence de la vie aérienne de la plante.

Dans l'atmosphère, la plante rencontre dans l'ammoniaque la source probablement unique de sa matière protéique, tous les physiologistes étant d'accord pour admettre aujourd'hui que l'azote gazeux de l'air n'est pas assimilé par les végétaux. Les expériences de M. Berthelot ont montré, il est vrai, que la cellulose, sous l'influence de l'effluve, peut fixer l'azote de l'atmosphère ambiante; il resterait à établir que la substance hydrocarbonée vivante de la plante fonctionne de même, pour être autorisé à étendre les conclusions des recherches de M. Berthelot à la Physiologie végétale.

Si mes expériences n'avaient accusé, entre les plantes ayant végété à l'air libre et celles qui ont poussé à l'abri de l'électricité atmosphérique, d'autre différence qu'une diminution dans le taux d'azote de ces dernières, j'aurais peut-être été autorisé à conclure dans ce sens; mais, d'une part, les écarts des taux d'azote, dont la moyenne accuse une diminution dans le cas des plantes sous cage, ne sont pas constants; tantôt il y a plus, tantôt moins de substance azotée formée (en centièmes); de l'autre, les modifications dans la nutrition de la plante tout entière sont tellement

grandes en l'absence d'électricité, que je n'ose pas me prononcer quant à présent sur le rôle de l'électricité dans la fixation de l'azote gazeux. Je ferai dès cette année une étude expérimentale attentive et aussi complète que possible de ce fait, mes expériences antérieures, sans être décisives, semblant devoir conduire à étendre à la matière vivante les faits constatés par M. Berthelot sur la cellulose.

En ce qui concerne le rôle de l'électricité atmosphérique dans la nitrification proprement dite, mes expériences et celles de M. Leclerc sont, je crois, décisives. Il y avait lieu, *a priori*, de penser que les sols hors cage et sous cage devaient se comporter, à ce point de vue, d'une façon identique, la tension électrique au niveau du sol, et à plus forte raison dans le sol, étant sinon nulle du moins très-faible.

Dans le but de vérifier le fait, j'ai institué deux expériences, l'une en 1877, l'autre cette année, et j'ai prié M. Leclerc de porter, de son côté, son attention sur le même point dans les essais de contrôle qu'il a bien voulu faire à Mettray. Je vais exposer successivement les résultats de ces trois expériences. J'ai dit précédemment (p. 150) que j'avais placé, le 1er avril 1877, dans chacune des deux caisses A et B, deux boîtes métalliques étanches, d'une surface ouverte de 1 décimètre carré et renfermant chacune 500 grammes environ de la terre même des caisses. Ces boîtes témoins, destinées à étudier la nitrification du sol pendant la durée des expériences, sont restées en place, exposées à toutes les influences atmosphériques, l'une sous cage, l'autre hors cage, jusqu'au 9 octobre de la même année, c'est-à-dire pendant six mois. Leur surface était en partie recouverte de quelques mousses et autres végétaux parasites que l'on a soigneusement enlevés avant de faire l'analyse du sol. Le Tableau suivant donne les résultats des analyses faites le 1er avril et le 10 octobre 1877, de la terre des témoins hors cage et sous cage.

Quantités d'azote organique, nitrique et ammoniacal contenues dans les témoins des caisses hors cage et sous cage.

	100 GRAMMES DE TERRE CONTENAIENT :		
	1er avril 1877.	9 octobre 1877.	
		Hors cage.	Sous cage.
	gr	gr	gr
Azote organique.......	0,156770	0,155830	0,156000
Azote ammoniacal	0,000507	»	»
Azote nitrique.... ...	0,005630	0,003470	0,004070
Azote total.........	0,161907	0,159300	0,160070
Perte totale en azote..		0,002607	0,001837
Perte pour 100 en azote total...		1,61	1,13
Perte pour 100 en azote organ....		0,599	0,555

Pendant les six mois qu'a duré l'expérience, les deux sols se sont donc, en l'absence de végétation, appauvris légèrement en azote; l'ammoniaque a disparu complétement, assimilée sans doute par les quelques mousses et autres végétations parasitaires qui commençaient à se développer dans les caisses témoins; l'azote nitrique a diminué de 20 pour 100 environ, et l'azote organique de 1 pour 100. L'absence d'électricité dans la couche d'air qui reposait sur le sol sous cage n'a donc point modifié sensiblement les phénomènes de nitrification. Il est superflu d'ajouter que, lorsque, à deux reprises, on a changé la cage métallique de caisse, les témoins ont été, le même jour, transportés d'une caisse dans l'autre.

Cette expérience me semble prouver qu'au niveau du sol non cultivé l'influence de l'électricité atmosphérique ne joue pas de rôle appréciable dans la nitrification des matières organiques azotées.

Comment se passent les choses dans les sols cultivés? C'est ce que vont nous montrer les expériences faites, en 1878, à Nancy et à Mettray.

1° *Nitrification dans le sol cultivé en* 1878 (Nancy).

Dans la case de végétation du jardin de la station agronomique qui a servi à la culture simultanée du tabac et du maïs pendant cet été, on a prélevé, dans les premiers jours de mars, un échantillon moyen du sol, sur une profondeur de $0^m,25$, et l'on y a dosé l'azote sous ses trois formes; à la fin des expériences, le 10 octobre suivant, on a fait la même opération et dosé de nouveau l'azote organique, ammoniacal et nitrique, dans la terre hors cage et dans le sol sous cage.

La surface de terre recouverte par la cage mesurait $0^m,50$ dans les deux sens; elle était donc égale à $0^{mq},250$; le poids du litre de terre étant de 1109 grammes et le volume de la terre qui a servi à chaque essai ($0^m,25$ sur $0^{mq},250$) étant de $62^{lit},50$, le poids de terre considéré s'élevait à $69^{kg},312$.

Voici les résultats des dosages d'azote avant et après culture, hors cage et sous cage:

	100 GRAMMES DE TERRE CONTENAIENT :		
	15 mars 1878.	10 septembre 1878.	
	Avant culture.	Sous cage.	Hors cage.
	gr	gr	gr
Azote organique ...	0,143210	0,142071	0,139447
Azote ammoniacal..	0,000397	0,000289	0,000217
Azote nitrique.....	0,004786	0,000030	0,000029
Azote total..	0,148393	0,142390	0,139693
Perte totale d'azote.......		0,006003	0,008700

Durant la végétation du tabac et du maïs, la plus grande partie de l'azote nitrique a disparu; l'ammoniaque a diminué très-notablement, ainsi que l'azote organique. Le calcul de ces pertes, établi sur la couche végétale tout entière, donnera une idée plus précise des emprunts faits à

l'azote du sol, sous ses trois formes, par le maïs et par le tabac récoltés hors cage et sous cage.

En appliquant les résultats de l'analyse centésimale aux $69^{kg},212$ de terre, on obtient les nombres suivants :

	LES $69^{kg},312$ RENFERMENT :		
	Terre avant culture.	Après culture. Sous cage.	Hors cage.
	gr	gr	gr
Azote organique........	99,263	98,472	96,653
Azote ammoniacal......	0,275	0,200	0,150
Azote nitrique.........	3,317	0,021	0,020
	102,855	98,693	96,823

Les pertes du sol en azote nitrique, ammoniacal et organique, après culture, s'élèvent aux chiffres suivants :

	Sous cage.	Hors cage.
	gr	gr
Azote nitrique...........	3,296	3,297
Azote ammoniacal...... ...	0,075	0,125
Azote organique...........	0,791	2,610
Azote total perdu par les sols.	4,162	6,032

L'azote nitrique et l'azote ammoniacal ont pu être assimilés par les plantes, soit directement, soit, pour l'azote nitrique, après transformation en ammoniaque; quant à l'azote organique, il n'a pu servir à la nutrition des maïs et des tabacs qu'après avoir passé à l'état de nitrate et d'ammoniaque, l'azote des combinaisons organiques ne pénétrant pas à cet état dans les végétaux.

Il résulte de cette première conclusion que, tandis qu'à l'abri de l'électricité atmosphérique le tabac et le maïs n'ont absorbé qu'une quantité d'azote organique transformé, s'élevant à $0^{gr},791$, le maïs et le tabac hors cage, soumis à l'influence électrique de l'air, ont assimilé des quantités de AzO^5 et de AzH^4O provenant de la nitrification d'un poids d'azote 3,29 fois plus considérable.

Si nous tenons compte maintenant du poids d'azote total assimilé par les récoltes de maïs et de tabac, et que nous retranchions respectivement de ces quantités les poids d'azote perdu par le sol, nous aurons, par différence, le nombre de grammes d'azote puisé dans l'air à l'état d'ammoniaque par les récoltes :

	Sous cage.	Hors cage.
Azote total des récoltes (maïs et tabac).	5^{gr},485	7^{gr},899

Emprunts faits au sol.

			Sous cage.	Hors cage.
Sous cage.				
Azote nitrique.............	3^{gr},296	} =	4,162	
Azote ammoniacal.........	0,075			
Azote organique...........	0,791			
Hors cage.				
Azote nitrique.............	3^{gr},297	} =		6,032
Azote ammoniacal.........	0,125			
Azote organique...........	2,610			
Déficit d'azote dans la récolte......			1,323	1,867

Ce déficit a été comblé par l'ammoniaque de l'air et par celle des pluies. Or, si l'on néglige de distinguer ces deux sources d'ammoniaque l'une de l'autre (je n'ai pas dosé l'ammoniaque dans l'eau des pluies du 15 mars au 9 octobre), et que l'on considère en bloc l'assimilation de l'ammoniaque aérienne par les deux récoltes, on trouve que les quantités d'azote empruntées à l'ammoniaque de l'air sont exactement proportionnelles aux poids des récoltes elles-mêmes. La récolte sous cage s'est élevée à 1405 grammes; elle a emprunté 1^{gr},323 d'azote au milieu aérien. La récolte hors cage, pesant 1^{kg},9395, aurait dû prendre 1^{gr},826 d'azote à l'air; l'expérience a donné 1^{gr},867, différence qui reste tout à fait dans les limites d'erreur de ce genre d'expériences.

On peut calculer approximativement, d'après ces données, les quantités d'ammoniaque qu'une récolte d'une superficie égale à 1 hectare emprunterait à l'atmosphère, et se faire ainsi une idée saisissante de l'importance des belles conceptions de M. Schlœsing sur le rôle du milieu aérien dans la nutrition azotée des végétaux. La surface du sol, dans chacun des essais rapportés plus haut, était de $\frac{1}{4}$ de mètre carré. Les quantités d'ammoniaque fixées, par mètre carré de récolte, s'élèvent donc :

Hors cage, à..............	7,468 gr
Sous cage, à..............	5,292

Cela donne à l'hectare:

Pour le sol libre...........	74,680 kg
Pour le sol sous cage.......	52,920

D'après l'analyse des récoltes, les maïs et tabacs renfermaient, pour la récolte de 1 mètre superficiel :

Hors cage.................	31,596 gr
Sous cage.................	21,940

1 hectare cultivé en maïs et tabac a donc emprunté :

	Azote	
	hors cage.	sous cage.
	kg	kg
Au sol....................	241,28	166,48
A l'air....................	74,68	52,92

La part de l'ammoniaque aérienne dans la nutrition azotée de ces plantes s'est donc élevée dans le premier cas à 23,63 pour 100, dans le second à 24,12 pour 100 de l'azote total de la récolte.

Il n'est pas sans intérêt de faire remarquer que la production annuelle moyenne de 1 hectare de forêt, s'élevant

à environ 6000 kilogrammes de substance organique sèche contenant 1 pour 100 d'azote, exige pour son alimentation 60 kilogrammes d'azote; que 1 hectare de prairies naturelles donne environ 4500 kilogrammes de substance sèche, renfermant approximativement 74 kilogrammes d'azote (1,66 pour 100), de telle façon que les emprunts faits par ces récoltes spontanées à l'ammoniaque de l'air suffisent pour expliquer la perpétuité de ces rendements dans des sols pourvus d'ailleurs des autres aliments minéraux indispensables et présentant des conditions physiques convenables.

L'atmosphère est donc un réservoir d'acide carbonique et d'ammoniaque où la végétation spontanée et, partant, sans fumure de main d'homme, va puiser indéfiniment son carbone et son azote ([1]).

En rapprochant les résultats de cet essai de culture des faits constatés pour le sol nu en ce qui concerne les transformations de l'azote organique, on arrive à quelques conclusions qui me semblent intéressantes.

Dans l'expérience de 1877, les sols témoins sans culture ont perdu, par nitrification naturelle probablement, sous cage 0,555 pour 100, hors cage 0,599 de l'azote organique de la terre.

Dans l'expérience de 1878, les sols cultivés en maïs et tabac ont perdu dans le même temps (six mois), sous cage 0,796 pour 100, hors cage 2,62 pour 100 de leur azote organique. Les sols mis en expérience n'étant pas les mêmes, on ne peut les comparer rigoureusement, mais le faible écart qui existe entre les pertes d'azote organique subies par les sols soustraits à l'influence électrique, comparé à la perte en azote organique plus que quadruple de

---

([1]) Les sols des dunes fixes, où le pin maritime donne des rendements élevés, ne contiennent que des quantités d'azote la plupart du temps impondérables; mais le voisinage de la mer apporte à la végétation beaucoup d'ammoniaque entraînée par les vents.

la case hors cage, permettrait peut-être d'attribuer à l'action de l'électricité, se prolongeant jusque dans le sol par la conductibilité de la plante elle-même, une influence directe sur la combustion lente des matières azotées du sol. Je crois que ces deux expériences montrent qu'il n'y a pas nitrification du sol sous l'influence électrique, en ce sens que le taux d'acide nitrique n'augmente pas dans le sol aux dépens de l'azote de l'air, mais qu'il y a lieu d'admettre une influence de la tension électrique sur la nitrification de la matière azotée du sol. En d'autres termes, le sol mis en contact avec l'électricité statique de l'atmosphère, par l'intermédiaire d'une plante d'une hauteur de 1^m, 50 à 2 mètres, ne s'enrichit pas en nitrates aux dépens de l'azote gazeux de l'air, mais voit s'activer la combustion des substances azotées qu'il renferme et qui deviennent ainsi aptes à nourrir sa récolte, à l'état de nitrates et d'ammoniaque. Les analyses des sols où les maïs ont végété, à Mettray, me fournissent des résultats de tous points confirmatifs de cette manière de voir, comme on va en juger.

2° *Nitrification dans le sol cultivé en* 1878 (Mettray).

Les dispositions adoptées par M. A. Leclerc, un peu plus compliquées que celles de mes expériences, ont eu pour avantage de fournir des résultats plus complets en ce qui concerne l'absorption de l'ammoniaque de l'air par les plantes.

Afin d'empêcher la fixation de l'ammoniaque de l'air et des pluies par le sol d'une des caisses précédemment décrites (p. 172), M. Leclerc, dès que les plants de maïs eurent atteint quelques centimètres de hauteur, recouvrit la caisse hors cage d'une feuille de caoutchouc souple, percée de trous en nombre égal aux tiges de maïs. Dans chacun de ces trous s'engageait une tige. La croissance des plantes fit que bientôt chacune des ouvertures se trouva obturée, de telle

sorte que le sol de la caisse fut complétement soustrait au renouvellement de l'air et à la pluie. On l'arrosa avec de l'eau distillée aussi souvent qu'il fut nécessaire pour maintenir dans le sol une humidité égale à celle de la terre de l'autre caisse. On nota avec soin les quantités d'eau tombée du 21 mai au 21 septembre et l'on dosa l'ammoniaque qu'elles renfermaient. Durant ces quatre mois, il tomba 295lit, 29 d'eau, contenant 183 milligrammes d'ammoniaque.

De même que dans l'expérience faite simultanément à Nancy, l'azote sous ses trois formes fut dosé dans la terre primitive le 20 mai, et dans chacune des caisses après l'enlèvement des récoltes (21 septembre).

Dans les 258 kilogrammes de terre renfermés dans chacune des caisses, M. Leclerc trouva les quantités suivantes d'azote organique, nitrique et ammoniacal, en tenant compte, pour le sol primitif, de l'azote des 49 graines de maïs :

	Sol avant culture.	Sol hors cage après la récolte.	Sol sous cage après la récolte.
	gr	gr	gr
Azote organique du sol.......	315,545	304,228	315,548
Azote organique des graines..	0,547	»	»
Azote ammoniacal..........	1,083	0,711	0,698
Azote nitrique.............	14,344	0,070	0,084
Azote total.....	331,519	305,009	316,330

Le dosage du carbone, fait aux mêmes époques dans le sol des deux caisses, a fourni les nombres suivants :

	Hors cage.	Sous cage.
	kg	kg
Carbone total..................	2,6788	2,6046
Carbone (avant culture)........	2,5303	2,5303
Gain du sol par la culture......	0,1485	0,0741
Gain en carbone, en centièmes...	5,54	2,93

Le sol, isolé par la cage, recevait seul les eaux pluviales, par suite de la disposition indiquée plus haut pour la caisse non isolée : il y a donc lieu de tenir compte de l'ammoniaque apportée par la pluie dans l'évaluation de la quantité d'azote mise au service des maïs qu'il a portés. Si l'on ajoute les 183 milligrammes d'azote ammoniacal de l'eau pluviale aux chiffres donnés précédemment, on trouve que les aliments azotés offerts par le sol des deux caisses à la récolte de maïs se décomposent de la façon suivante :

Sol avant la culture :

	Hors cage.	Sous cage.
	gr	gr
Azote organique du sol.......	315,545	315,545
Azote organique des graines...	0,547	0,547
Azote ammoniacal du sol......	1,083	1,083
Azote nitrique..............	14,344	14,344
Azote ammoniacal des pluies..	»	0,183
Azote total......	331,519	331,702

Après la récolte on trouve :

Azote organique............	304,228	315,548
Azote ammoniacal...........	0,711	0,698
Azote nitrique..............	0,070	0,084
Azote restant......	305,009	316,330
Les plantes avaient donc consommé.................	26,510 et	15,372

d'azote, se décomposant de la manière suivante :

	Récolte hors cage.	Récolte sous cage.
	gr	gr
Azote organique............	11,864	0,544
Azote ammoniacal...........	0,372	0,568
Azote nitrique..............	14,274	14,260
Azote total........	26,510	15,372

Les deux récoltes de maïs, dont j'ai fait connaître précédemment la composition élémentaire et la composition immédiate, renfermaient :

	Hors cage.	Sous cage.
Substance sèche (¹)........	$12^{kg},109$	$8^{kg},913$
Azote total (¹)...	$41^{gr},118$	$29^{gr},557$

Ces récoltes ont donc emprunté à l'ammoniaque atmosphérique, la première (hors cage) $14^{gr},608$ d'azote, la deuxième (sous cage) $14^{gr},185$ du même corps.

Si l'absorption de l'azote ammoniacal de l'air était restée proportionnelle au taux d'azote des récoltes sèches des deux caisses, la quantité d'azote empruntée à l'atmosphère par la végétation de la caisse isolée serait donnée par la proportion suivante :

$$14^{gr},608 : 12^{kg},109 :: x : 8^{kg},913,$$

d'où

$$x = 10^{gr},752.$$

Mais nous devons voir que l'emprunt fait par cette récolte à l'ammoniaque atmosphérique s'élève à $14^{gr},185$. D'où vient donc la différence ($14^{gr},185 - 10^{gr},752$), égale à $3^{gr},433$? Suivant toutes probabilités, cette quantité d'azote a été apportée au sol par l'ammoniaque de l'air qui était en contact direct avec lui, tandis que le sol de la caisse voisine était hermétiquement séparé de l'atmosphère par la lame de caoutchouc.

Le calcul suivant, basé sur une expérience antérieure que M. A. Leclerc m'a communiquée, semble justifier cette hypothèse. 100 grammes d'une terre identique à celle des caisses de végétation, étalés sur une surface de 1 décimètre carré et exposés à l'air dans le voisinage des caisses,

(¹) Tiges, feuilles, fleurs et racines.

pendant quatorze jours, ont fixé $0^{gr},004$ d'ammoniaque ([1]).

Cette fixation correspond, pour la durée des expériences de cette année (cent vingt jours), et pour une surface de 1 mètre carré (surface des caisses), à $2^{gr},823$ d'azote ammoniacal; si l'on ajoute ce chiffre d'azote à $10^{gr},752$, on obtient $13^{gr},565$, nombre très-voisin de celui que l'expérience directe a fourni pour l'emprunt fait à l'ammoniaque de l'air par la récolte isolée. Il est possible que, si M. Leclerc avait dosé l'ammoniaque de l'air fixée par le sol pendant l'expérience de culture de cette année, les nombres trouvés eussent présenté une concordance plus grande que celle qui résulte de mon calcul.

Sur les $41^{gr},118$ d'azote de la récolte hors cage, l'absorption de l'ammoniaque de l'air s'étant effectuée par les feuilles et les tiges seulement et non par le sol et par les racines, le maïs a emprunté à l'air $14^{gr},608$ d'azote ammoniacal, soit 35,5 pour 100 de l'azote de ses tissus.

Rapporté à l'hectare d'une culture de maïs, dans les mêmes conditions, cet emprunt s'élèverait à 146 kilogrammes d'azote ammoniacal. Je suis donc en droit, d'après les résultats si analogues obtenus en Lorraine et près de Tours, dans la même année, de considérer ces faits comme une confirmation évidente du rôle si important attribué par M. Schlœsing à l'ammoniaque de l'air dans la nutrition des végétaux. Jusqu'à preuve du contraire, j'estime, avec lui, que l'origine véritable, la source primordiale des matériaux azotés des êtres vivants, plantes et animaux, réside dans l'ammoniaque de l'air apportée aux végétaux par les courants qui traversent les mers et restituée à l'Océan sous forme de nitrates, que des réductions ultérieures transforment à nouveau en ammoniaque. L'étincelle électrique et les effluves obscures seraient donc,

---

([1]) La proximité de l'usine à gaz qui alimente le laboratoire explique cette richesse de l'air en ammoniaque.

comme l'a depuis longtemps pensé et écrit M. Boussingault, l'origine de l'azote assimilable par les plantes; à cette source prédominante il convient peut-être d'ajouter les émanations ammoniacales des volcans et des solfatares.

En dehors de ces deux origines, nous ne connaissons pas d'autre source démontrée d'ammoniaque ou de nitrates, puisque la nitrification, la décomposition des matières protéiques par la putréfaction, en un mot toutes les actions chimiques qui amènent la destruction des substances azotées, sont constamment accompagnées du retour à l'état gazeux d'une partie de l'azote de ces matières.

Dans le sol et par l'intermédiaire des végétaux, très-bons conducteurs, l'électricité atmosphérique semble, d'après les expériences rapportées plus haut, favoriser à un haut degré la nitrification des matières azotées qui s'y trouvent, mais non la combinaison directe de l'azote et de l'oxygène gazeux, comme cela se passe dans l'air. Reste, enfin, l'application possible aux tissus vivants de la découverte qu'a faite M. Berthelot de la fixation de l'azote gazeux par la cellulose, l'amidon, etc., sous l'influence de l'effluve et de l'électricité atmosphérique; mais, avant d'oser conclure à la réalisation de cette fixation chez la plante vivante, je crois nécessaire, pour les raisons que j'ai données plus haut, de faire de nouvelles expériences dans la voie que j'ai indiquée.

III. — Résumé et conclusions.

Application à l'Agriculture et à la Sylviculture.

Tout en reconnaissant, mieux que personne, ce que mes expériences présentent encore de lacunes et d'imperfections, je me crois, cependant, autorisé à en tirer, dès à présent, quelques conclusions applicables à l'Agriculture et à la Sylviculture. Les faits exposés plus haut et les dé-

ductions qui en découlent peuvent se résumer dans les propositions suivantes :

1° La méthode la plus simple et la meilleure à la fois pour isoler une plante de l'action de l'électricité atmosphérique consiste à la placer soit sous une cage métallique à larges mailles, soit dans le périmètre d'un arbre. On peut ainsi soustraire complétement le végétal et le sol en expérience à l'influence de l'électricité à faible tension que l'air manifeste constamment, tout en laissant arriver jusqu'à eux l'air, l'humidité, la pluie et la lumière.

2° Les végétaux, et en particulier les arbres, soutirent à leur profit l'électricité atmosphérique et isolent aussi complétement qu'une cage métallique la plante qu'ils dominent.

3° L'isolation produite par un arbre élevé peut s'étendre notablement au delà du périmètre foliacé de l'arbre.

4° Une plante soustraite à l'influence de l'électricité atmosphérique subit, dans son évolution et dans son développement, un retard et une diminution très-notables. Dans mes expériences, les quantités de substance vivante produites par les végétaux isolés ont été inférieures de 30 à 50 pour 100 à la production à l'air libre. La transformation du protoplasma chlorophyllien en glucose, en amidon, etc., paraît tout particulièrement influencée par l'électricité atmosphérique. L'arrêt dans l'assimilation semble porter tout d'abord sur l'élaboration des principes hydrocarbonés.

5° La floraison et la fructification subissent des modifications non moins grandes ; sous cage isolante et sous les arbres, le nombre des fleurs, des fruits et le poids des graines ont été inférieurs de 40 à 50 pour 100.

6° Le taux centésimal de substance sèche et le taux des cendres sont plus élevés en l'absence de l'électricité, les végétaux qui croissent hors cage s'étant constamment

montrés plus riches en eau et plus pauvres en matières minérales que la plante de même espèce sous cage isolante.

Il serait intéressant de mesurer par des expériences directes les quantités d'électricité à diverses altitudes, les feuilles des arbres et les récoltes des pâturages élevés donnant à l'analyse des taux plus élevés d'azote et plus bas de cendres que les mêmes essences végétales croissant dans les vallées.

7° L'électricité atmosphérique ne semble pas favoriser la combinaison directe de l'azote de l'air avec l'oxygène ni avec les matières hydrocarbonées des sols; mais elle exercerait, au contraire, une notable influence sur la nitrification des matières azotées du sol, par l'intermédiaire de la plante, faisant l'office de conducteur de l'électricité atmosphérique.

8° L'électricité atmosphérique, d'après tout ce qui précède, est un facteur prépondérant de la production végétale. Toutes conditions égales, d'ailleurs, qualités physiques et chimiques du sol, température, exposition, climat, la végétation prendra un plus grand développement dans les lieux où l'action électrique de l'air peut se faire sentir. L'atmosphère chargée d'électricité, comme c'est le cas des temps d'orage, concourt activement au développement des plantes; elle favorise la floraison et la fructification des récoltes. La végétation tropicale doit compter au nombre de ses facteurs importants l'état électrique de l'atmosphère de ces régions.

9° Inversement, la suppression de l'état électrique de l'air par suite de la présence d'un grand arbre place la végétation dominée par cet arbre dans des conditions défavorables : ce phénomène joue incontestablement un rôle considérable dans ce qu'on nomme l'influence du couvert sur les taillis sous futaie et sur le sol des futaies. Dans la futaie, la tension électrique étant constamment

nulle au-dessous des arbres qui la constituent, les végétaux qui y croissent se trouvent dans des conditions identiques à celles des plantes sous cage. Aux causes connues ou inconnues de l'action du couvert, diminution dans l'éclairage, lumière verte réfléchie, etc., il convient d'ajouter l'absence totale d'électricité sous le massif.

10° L'action nuisible pour les récoltes avoisinantes des arbres à haute tige plantés le long des routes, celle des arbres isolés dans les vignes, non moins manifeste, peuvent s'expliquer par les mêmes causes. Tout en admettant que les arbres peuvent gêner les récoltes par le développement de leurs racines, par leurs exigences en principes minéraux : que les arbres des forêts dont les cimes se touchent, non-seulement interceptent la lumière directe du soleil, mais ne laissent plus arriver aux végétaux sous-jacents que de la lumière verte réfléchie, tout en reconnaissant enfin que le voisinage des arbres exerce, pour des causes nombreuses et diverses, une influence certaine sur la végétation dominée par eux, je crois que la cause nouvelle, mise en lumière par mes expériences, doit être prépondérante et entrer pour une très-large part dans l'explication de l'influence du couvert.

Aujourd'hui que les progrès de la Physique permettent d'enregistrer d'une façon continue l'état électrique si variable de l'atmosphère, j'espère qu'on pourra, par la comparaison des tracés graphiques si précieux fournis par l'électrographe de A. Redier, avec l'état de la végétation dans le même lieu, arriver à préciser les rapports qui unissent les deux phénomènes.

J'estime, avec M. Berthelot, que ces études réservent un grand nombre de découvertes du plus haut intérêt à ceux qui les poursuivront [1]. Je me réserve de continuer mes recherches et d'étudier particulièrement, dès l'été pro-

---

[1] *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, séance du 8 juillet 1878.

chain, l'influence de l'électricité atmosphérique sur la fixation de l'azote par les tissus végétaux.

IV. — Appendice.

L'électricité atmosphérique et les physiciens du dix-huitième siècle.

Lorsque, au mois de mars 1877, j'ai commencé les recherches dont la lecture du *Traité d'électricité statique* de M. E. Mascart m'avait suggéré l'idée, je considérais la question comme absolument neuve. Elle l'était pour moi, et, si j'en juge par le silence complet des Ouvrages de Physique et de Physiologie végétale les plus récents, elle devait l'être également pour les savants contemporains. M. J. Sachs, l'un des naturalistes les plus distingués de notre époque, s'exprime en ces termes à ce sujet :

> Les plantes sont constamment exposées aux variations de l'état électrique de l'air et du sol; par leur position, elles semblent destinées à agir comme conducteur entre ces deux milieux; de plus, elles sont remplies de liquides électrolytiques; mais nous ne savons absolument pas si ces circonstances agissent spécialement sur l'assimilation, la transformation des substances, leur translation, la forme des organes, etc. Les idées émises à ce sujet qui se rencontrent dans des travaux dispersés ne résolvent aucune question d'une manière satisfaisante et sont à peine dignes d'être mentionnées (1).

A part les citations que j'ai empruntées à M. Mascart (*voir* p. 146) et en dehors des belles expériences dont il m'avait lui-même rendu témoin sur la croissance plus rapide des plantes et sur l'évaporation plus active du sol soumis à l'effluve produite par la machine de Holz, je n'ai trouvé dans aucun des Traités modernes une seule indication que ces problèmes aient été antérieurement l'objet

(1) *Physiologie végétale*, p. 81; trad. de Marc Micheli. Genève, 1868.

d'études expérimentales. Le silence gardé par les auteurs contemporains me donne lieu de penser qu'un résumé historique de la question aura, pour la plupart des lecteurs des *Annales,* la nouveauté qu'il m'a offerte lorsque, par la lecture des Ouvrages dont je vais parler, j'ai reconnu que les physiciens du XVIIIe siècle possédaient déjà des notions positives sur l'influence de l'électricité statique sur les êtres vivants, et particulièrement sur la végétation.

De 1746 à 1749, trois physiciens, l'abbé Nollet en France ([1]), Jallabert à Genève ([2]) et Mambray à Édimbourg, ont fait, chacun de son côté, des expériences sur l'influence de l'électricité statique sur l'accroissement des végétaux. En 1783, l'abbé Bertholon, professeur de Physique expérimentale des états généraux de la province de Languedoc, a publié tout un volume sur l'électricité des végétaux ([3]). Une analyse succincte des recherches de l'abbé Nollet et de celles de l'abbé Bertholon montrera quel sentiment exact de la question ont eu, il y a un siècle, ces habiles expérimentateurs, dont le nom ne saurait, sans une véritable injustice, être omis par les physiciens qui écriraient l'histoire de leur science de prédilection. Je m'attacherai tout spécialement aux expériences de Nollet et de Bertholon, dont la netteté et l'originalité n'ont rien à envier à celles de leurs successeurs.

Le livre de l'abbé Nollet est divisé en cinq discours, dont les deux derniers seuls m'occuperont. Ils ont trait à l'in-

---

([1]) *Recherches sur les causes particulières des phénomènes électriques, et sur les effets nuisibles ou avantageux qu'on peut en attendre,* par l'abbé Nollet, de l'Académie royale des Sciences, etc. Paris, chez les frères Guérin ; 1749.

([2]) *Expériences sur l'électricité, avec quelques conjectures sur les causes de ses effets;* par Jallabert. Genève, 1748.

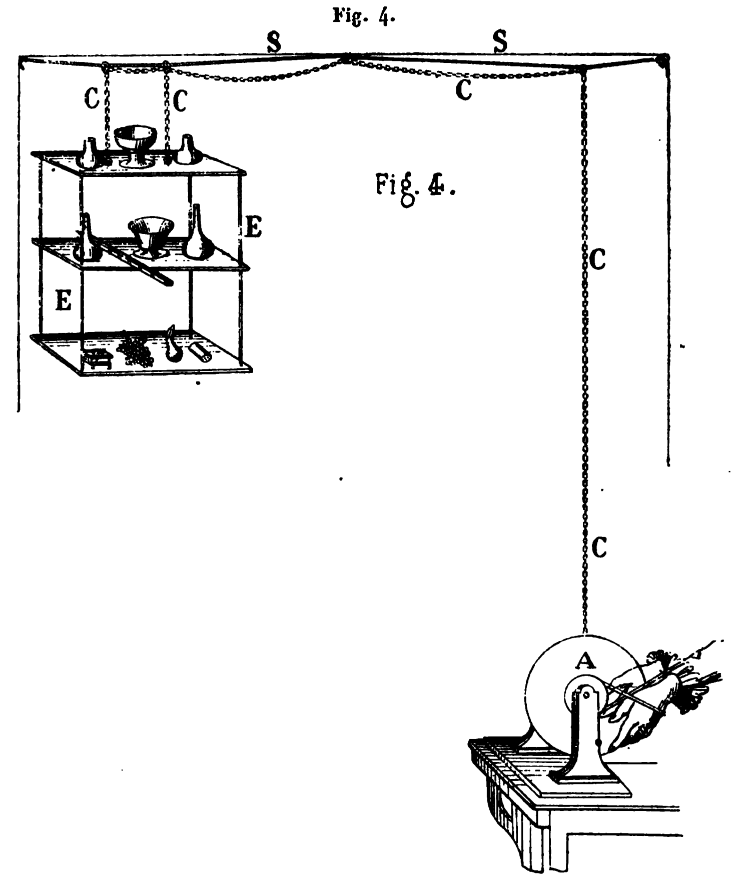
([3]) *De l'électricité des végétaux, ouvrage dans lequel on traite de l'électricité de l'atmosphère sur les plantes, de ses effets sur l'économie des végétaux, de leurs vertus médico et nutritivo-électriques, et principalement des moyens de pratique de l'appliquer utilement à l'Agriculture, avec l'invention d'un électro-végétomètre ;* par l'abbé Bertholon, professeur, etc. Paris, chez Didot jeune, 1783.

fluence de l'électricité sur l'évaporation et à son action sur les êtres organisés.

1. *Influence de l'électricité statique sur l'évaporation.*

La *fig.* 4 représente la disposition ingénieuse adoptée par l'abbé Nollet et décrite par lui en ces termes ([1]) :

Fig. 4.



Je fis faire une espèce de cage de trois grandes feuilles de tôle, disposées parallèlement entre elles, distantes l'une de l'autre

([1]) *Loc. cit.*, p. 316 et suiv.

d'environ 1 pied et tenues aux quatre coins par des montants en fer ; je suspendis cette cage par deux anneaux de métal à un gros cordon de soie SS tendu horizontalement; j'y plaçais tout ce que je voulais électriser, et j'y conduisais l'électricité par le moyen d'une chaîne de fer CC qui la recevait d'un globe de verre A ; deux hommes forts, que deux autres relevaient de temps en temps, faisaient tourner ce globe, tandis qu'une troisième personne y tenait les mains appliquées pour le frotter.... Avec cet appareil, je me munis encore d'une balance assez mobile pour trébucher par le poids d'un grain lorsque les bassins étaient chargés de 7 à 8 livres.... Je me mis ensuite à exécuter le projet que j'avais formé d'électriser pendant quatre ou cinq heures de suite, et à différentes fois, des quantités connues de diverses matières, pour voir : 1° si elles diminueraient de poids ; 2° si elles changeraient de qualités. J'ai éprouvé d'abord des liqueurs et ensuite des corps solides non organisés, et j'ai considéré comme tels ceux qui le sont naturellement, mais dont les parties organiques ne font plus de fonctions, tels que les fruits détachés de leurs arbres, les plantes séparées de la terre, la chair des animaux morts, etc. Pour savoir avec quelque certitude si l'électricité était capable de changer le poids de tous ces corps, j'en pesais deux de la même espèce et à peu près de même volume, et l'on en tenait compte par écrit; l'un était électrisé pendant quatre ou cinq heures, et l'autre, pendant tout ce temps-là, demeurait dans le même lieu, mais à l'écart, après quoi on le pesait encore... Si l'électricité devait diminuer le poids des liqueurs, cette diminution pouvait être considérée comme une évaporation forcée....

L'abbé Nollet a expérimenté sur les liquides les plus divers : eau, vinaigre, urine fraîche, lait nouveau, huile d'olives, essence de térébenthine, esprit-de-vin, ammoniaque, mercure.

La différence entre les pertes subies par 4 onces de chacun des liquides suivants abandonnés à l'air libre ou soumis à l'électrisation pendant le même temps (cinq heures) a été la suivante.

	Grains.
Eau de Seine	5
Vinaigre rouge	2
Solution de nitre	3
Urine fraîche	7
Lait	4
Essence de térébenthine	7
Esprit-de-vin	8
Ammoniaque liquide	11
Mercure	0
Huile d'olive	0

Conclusions :

1° L'électricité augmente l'évaporation naturelle des liqueurs, puisque, à l'exception du mercure qui est trop pesant et de l'huile d'olive dont les parties ont trop de viscosité, toutes les autres qui ont été éprouvées ont souffert des pertes qu'il n'est guère possible d'attribuer à d'autres causes qu'à l'électricité.

2° L'électricité augmente d'autant plus l'évaporation que la liqueur sur laquelle elle agit est par elle-même plus évaporable.

Les expériences sur les corps solides ont donné à Nollet des résultats analogues. La différence des pertes dans le même temps des corps électrisés ou non a été la suivante :

	Grains.
Poire de beurré blanc pesant 4 onces	6
Grappe de raisin blanc	7
Éponge légèrement humide	6
Pied de basilic fraîchement coupé	5
Morceau de chair	3
....	
....	
Paquet de clous	0

Conclusions :

1° L'électricité fait diminuer le poids des corps même qui

ont la consistance des solides, pourvu qu'ils aient dans leurs pores quelques sucs ou quelque humidité propre à s'évaporer.

2° Les effets de l'électrisation sur les corps solides, toutes choses égales d'ailleurs, sont plus grands quand il y a plus de surface...

C'est dans le cinquième Discours, consacré aux *effets de la vertu électrique sur les corps organisés*, que se trouvent les expériences les plus intéressantes.

Après avoir démontré que l'écoulement d'un liquide par un tube capillaire, de discontinu qu'il était dans les conditions ordinaires, devient continu et partant beaucoup plus rapide lorsqu'on électrise le vase qui renferme le liquide, Nollet se demande si une action du même genre ne se produirait pas sur les vaisseaux capillaires des êtres organisés, « *qu'on peut regarder en quelque façon comme des machines hydrauliques préparées par la nature même* ».

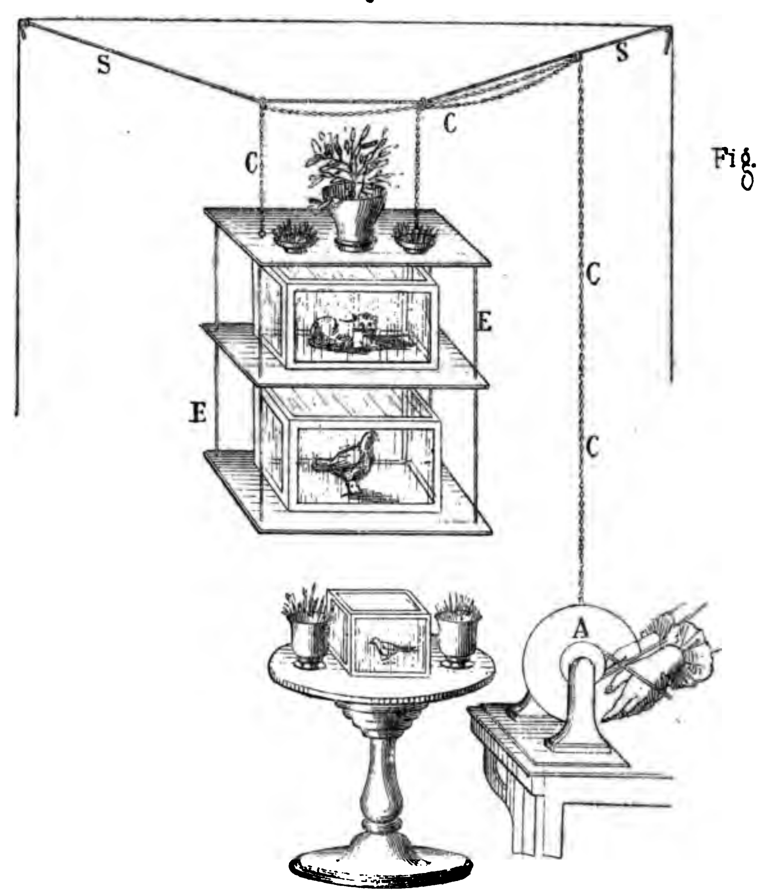
Je pensai, dit-il, que son action pourrait bien se faire sentir sur la séve des végétaux, ou donner aux fluides qui entrent dans l'économie animale quelque mouvement qui leur serait avantageux ou nuisible.

Au moment où Nollet étudiait ces questions, il apprit que Mambray avait, pendant tout le mois d'octobre 1746, électrisé à Édimbourg deux myrtes qui poussèrent à la fois de petites branches et des boutons, ce que ne firent pas de pareils arbustes non électrisés. En 1748, Jallabert avait publié, à Genève, des résultats identiques.

Nollet, encouragé par ces observations, qui confirmaient ses vues, résolut d'entreprendre des expériences sur les plantes et sur les animaux ; il se servit du dispositif représenté par la *fig.* 5. Dans la cage en tôle EE étaient placés les objets à électriser ; sur un guéridon situé à quelque distance de l'appareil reposaient les mêmes objets pour servir de termes de comparaison. Je crois devoir rapporter en

entier le passage relatif aux expériences sur la germination, ainsi qu'une Note sur l'aspect des plantes électrisées

Fig. 5.



dans l'obscurité. Je donnerai ensuite un résumé des résultats obtenus sur les animaux.

Le 9 octobre de l'année 1747, je fis remplir de la même terre deux petites jattes d'étain toutes semblables ; je semai dans chacune une égale quantité de grains de moutarde pris au même

paquet, je les laissai deux jours dans le même lieu sans y faire autre chose que les arroser et les exposer aux rayons du soleil depuis environ 10 heures du matin jusqu'à 3 heures après midi.

Le 11 du même mois, c'est-à-dire deux jours après avoir semé la graine, je plaçai une des jattes, marquée de la lettre A, dans la cage de tôle, où elle fut électrisée pendant dix heures, savoir le matin depuis 7 heures jusqu'à midi, et le soir depuis 3 heures jusqu'à 8; pendant tout ce temps-là, l'autre jatte était à l'écart, mais dans la même chambre, où la température était assez uniformément de 13 degrés $\frac{1}{2}$ au thermomètre de M. de Réaumur.

Le 12, ces deux jattes furent exposées ensemble au soleil et arrosées également; on les rentra de bonne heure le soir, et je n'y aperçus encore rien de levé.

Le 13, à 9 heures du matin, je vis dans la jatte électrisée trois graines levées, dont les tiges étaient de 3 lignes hors de terre; la jatte non électrisée n'en avait aucune : on eut de l'une et de l'autre le même soin que le jour précédent, et l'on électrisa le soir, pendant trois heures, celle qui était destinée à cette épreuve.

» Le 14 au matin, la jatte électrisée avait neuf tiges hors de terre, dont chacune était longue de 7 à 8 lignes, et l'autre n'avait encore absolument rien de levé; mais, le soir, j'en aperçus une dans celle-ci, qui commençait à se montrer. La première fut encore électrisée ce jour-là pendant cinq heures de l'après-midi.

Enfin, pour abréger ce détail, il suffira de dire que, jusqu'au 19 octobre, je continuai de cultiver également ces deux portions de terre ensemencées, en électrisant toujours une et toujours la même pendant plusieurs heures tous les jours, et qu'au bout de ce terme, c'est-à-dire après huit jours d'expériences, les graines électrisées étaient toutes levées et avaient des tiges de 15 à 16 lignes de hauteur, tandis qu'il y en avait à peine deux ou trois des autres hors de terre, avec des tiges de 3 à 4 lignes au plus.

Cette différence était si marquée, que je fus tenté de l'attribuer à quelque cause accidentelle que je ne connaissais pas; mais, au retour d'un petit voyage que je fus obligé de faire, je trouvai toutes les graines levées dans la jatte qui n'avait pas été électrisée, et je commençai à croire avec quelque confiance que

l'électricité avait accéléré véritablement la végétation et l'accroissement des autres.

Quoique cela parût assez clairement indiqué par l'expérience que je viens de citer, je ne me suis rendu à cette conséquence qu'après plusieurs épreuves réitérées sur différentes graines et suivies de résultats à peu près semblables..... Il m'a semblé aussi que les graines dont l'électricité avait hâté la germination avaient poussé des tiges plus minces et plus faibles que celles qu'on avait laissées lever d'elles-mêmes; mais je n'oserais l'assurer, n'ayant pas eu un assez grand nombre d'expériences pour m'en rendre certain [1].

Voici la Note relative à l'électrisation d'une plante dans l'obscurité :

« C'est une chose curieuse à voir qu'une plante qu'on électrise dans l'obscurité : si c'est un pied de basilic, par exemple, de romarin, etc., de l'extrémité de chaque feuille, surtout si l'on en approche la main à une certaine distance, il sort un souffle très sensible et une aigrette lumineuse. Je n'ai pas remarqué qu'une plante grasse ou aromatique fît mieux qu'une autre; mais j'ai toujours vu que les parties les plus flexibles faisaient effort pour s'écarter les unes des autres, comme il arriverait infailliblemeut aux fils d'une frange que l'on rendrait électrique; la même chose arrive sans doute aux feuilles d'une fleur, et c'est peut-être ce qui a fait dire à M. Boze que l'électricité fait épanouir les roses, les renoncules....

Il résulte de ces citations que l'abbé Nollet a constaté l'influence de l'électrisation sur le développement des graines, des plantes, et qu'il a reconnu la faculté conductrice des tissus végétaux; mais nulle part il n'est fait allusion au rôle de l'électricité naturelle sur la végétation.

Dans une nouvelle série d'expériences, il applique la même méthode à l'étude de l'action de l'électricité sur les animaux et sur l'homme. Il constate : 1° qu'un animal soumis pendant quatre à cinq heures à l'action de l'élec-

---

[1] *Loc. cit.*, p. 358 et suiv.

tricité statique subit des pertes de poids beaucoup plus grandes que les mêmes animaux non électrisés; 2° que les pertes de poids subies sont d'autant plus grandes que l'animal est d'une espèce plus petite. Je me bornerai à citer quelques-uns des résultats consignés dans les nombreux Tableaux qui résument ces expériences intéressantes :

1° *Chat.* — 4 expériences.

	Perte du chat électrisé.	Perte du chat non électrisé.	Différence.
	grains.	grains.	grains.
1......	162	96	66
2......	160	82	58
3......	192	90	30
4......	216	86	58

2° *Pinsons et Bruants.*

	Perte par l'électricité.	Perte des animaux non électrisés.	Différence.
	grains.	grains.	grains.
1.	22	12	10
2......	25	20	5
3......	24	18	6
4......	26	18	6

Rapportées au poids des animaux soumis aux expériences, ces pertes sont pour le pinson de $\frac{1}{17}$ de son poids, pour le pigeon de $\frac{1}{140}$; pour le chat, la perte est bien plus faible encore. Nollet avait pris soin de faire les contre-épreuves en changeant, dans diverses expériences, le rôle des animaux. Ces pertes n'étaient donc pas dues à des accidents individuels.

Je m'arrête là pour les expériences de l'abbé Nollet; je crois en avoir dit assez pour montrer que l'honneur lui revient d'avoir le premier constaté expérimentalement

l'influence de l'électricité sur l'évaporation des corps inertes ou vivants et sur la germination des végétaux.

L'année même où paraissait à Paris le livre de l'abbé Nollet, Franklin résumait sur son cahier de laboratoire (7 novembre 1749) les propriétés communes au fluide électrique et à la foudre (1). Trois ans plus tard, d'Alibart à Marly-la-Ville (10 mai 1752) et Franklin en Amérique réalisaient la démonstration expérimentale de cette conception et soutiraient des nuages l'électricité dont ils étaient chargés. Il s'écoula environ vingt-cinq ans avant que l'on songeât à faire quelques rapprochements entre les expériences de Nollet et la découverte de Franklin.

Duhamel de Monceau est, à ma connaissance, le premier naturaliste qui ait fait quelques observations précises sur les rapports de l'état électrique de l'air avec le développement de la végétation. Dans le Livre V, Chapitre II, de la *Physique des arbres,* il insiste sur la croissance rapide des plantes pendant les temps orageux et sur l'action bienfaisante des pluies, même pour les plantes aquatiques. Je ne citerai qu'un passage significatif:

.... Mais les circonstances qui me paraissent les plus favorables à la végétation sont quand, après une pluie assez abondante, il survient un temps couvert accompagné d'un air chaud et disposé à l'orage; en un mot, de cette disposition de l'air qu'on appelle communément lourd, pesant, parce qu'alors on a peine à supporter le travail.

Dans une pareille circonstance où les vapeurs s'élevaient en si grande abondance que la terre paraissait fumer, je m'avisai de mesurer un brin de froment épié, et je trouvai qu'en trois fois vingt-quatre heures il s'était allongé de plus de 3 pouces; dans le même temps, un brin de seigle s'allongea de 6 pouces et un sarment de vigne de près de 2 pieds....

.... Toutes les observations que je viens de rapporter prou-

---

(1) MASCART, *Traité d'électricité statique,* t. II, p. 556.

vent, ce me semble, très-bien que la chaleur, jointe à l'humidité, est très-favorable à la végétation; néanmoins, la réunion de ces deux principes ne suffit pas encore, car lorsque, dans les étés chauds et secs, on arrose les plantes des potagers, on empêche à la vérité qu'elles ne meurent, on les met même en état de faire quelques progrès; mais elles ne végètent jamais avec autant de force que quand elles reçoivent l'humidité des pluies : bien plus, j'ai aperçu très-sensiblement que les arrosements étaient bien plus avantageux aux plantes quand on les faisait lorsque le temps était disposé à l'orage que quand il était beau et serein. Ainsi l'on peut dire que les grandes chaleurs et les longues sécheresses sont préjudiciables à la plupart des plantes, et qu'elles profitent plus en huit jours de temps couvert et accompagné de pluies douces, que pendant un mois de sécheresse, et nonobstant le soin que l'on a de les arroser.... J'ai plusieurs fois remarqué, et avec étonnement, que les changements de temps produisent des effets sensibles sur le nénuphar, le volant d'eau, le cresson..., qui ont leurs racines et presque toute leur tige plongées dans l'eau, de sorte que, lorsqu'on a fauché une mare, un étang, une rivière, s'il faut quinze jours aux plantes qui y renaissent pour gagner la superficie de l'eau par un temps pluvieux, il leur faudra plus d'un mois lorsque le temps est à la sécheresse....

..... On aperçoit dans la nature d'autres agents très-puissants qui peuvent occasionner cet effet ; la vertu magnétique et celle de l'électricité peuvent être apportées pour exemples : qui sait s'il n'y en a pas encore une infinité d'autres? M. l'abbé Nollet et M. Le Mosnier, le médecin, et plusieurs autres physiciens nous ont déjà fait entrevoir que l'électricité peut influer sur la végétation....

Nollet et ses contemporains ont montré l'influence de l'électricité statique sur les végétaux ; Duhamel du Monceau entrevoit l'influence de l'électricité atmosphérique sur la croissance des plantes dans leur milieu naturel; l'abbé Bertholon va affirmer le lien étroit qui unit les phénomènes de la végétation à l'état électrique de l'air :

L'électricité de l'atmosphère a sur les plantes, comme sur tous

les animaux, et particulièrement sur l'homme, une influence bien caractérisée; ce sujet n'ayant jamais été traité, il est nécessaire d'en démontrer la réalité et l'importance [1].

Le livre de l'abbé Bertholon mérite d'être lu entièrement par ceux qui s'occupent spécialement de la science des êtres vivants. L'unité de la vie chez les animaux et chez les plantes y est soutenue avec une conviction appuyée d'arguments que l'imperfection de la Physiologie du temps rend très-incomplets, mais qui dénotent de la part de leur auteur une sûreté de vue, un sens philosophique rares.

Dans les divers Chapitres de son Livre, divisé en trois Parties, l'abbé Bertholon rappelle les observations antérieures de Nollet, Boze, Jallabert, celles de Nuneberg, physicien de Stuttgart, qui a obtenu, en électrisant des oignons, des accroissements considérables comparativement au développement des mêmes plantes non électrisées. Il passe ensuite en revue le rôle de l'électricité atmosphérique dans la germination, la multiplication des branches, des fleurs et des fruits, l'influence de la vapeur d'eau de l'air véritable conducteur de l'électricité, etc. Cette partie, dogmatique, pour ainsi dire, est très-intéressante, mais je ne puis qu'y renvoyer mes lecteurs : une analyse détaillée des faits rapportés et des interprétations de l'auteur m'entraînerait, en effet, bien au delà des bornes que je me suis tracées. L'exposé de l'abbé Bertholon dénote des idées très-arrêtées sur les choses dont il parle; il est convaincu jusqu'à l'évidence de l'importance du rôle de l'électricité atmosphérique dans les phénomènes naturels de la végétation. Il est vraiment bien étrange que ce livre soit tombé dans un oubli complet et qu'aucun Traité moderne de Physique ou de Physiologie végétale n'en fasse mention.

Je m'arrêterai à la partie expérimentale, tout à fait originale, de l'œuvre du professeur du Languedoc, dont les

---

[1] BERTHOLON, p. 5.

deux planches, reproduites d'après l'original, donnent une idée nette.

Convaincu de l'importante action de l'électricité atmosphérique sur la végétation, l'abbé Bertholon s'est proposé de « *remédier au défaut dans la quantité d'électricité naturelle, relativement aux végétaux* ».

Il me faut ici citer textuellement quelques pages de la troisième Partie ([1]) :

Il y a habituellement dans l'atmosphère une grande quantité de matière électrique qui y est répandue; elle existe toujours dans les hautes régions. Sur les montagnes elle se fait toujours sentir avec plus d'énergie que dans les plaines. Lorsqu'on est dans celles-ci, en élevant des conducteurs ou en lançant des cerfs-volants électriques qui aillent au-devant d'elle, pour ainsi dire, la chercher et la ramener vers la surface de la terre où plusieurs causes l'empêchent quelquefois de se montrer, on la voit aussitôt soumise à la voix de l'homme, lui obéir, descendre en quelque sorte du ciel et venir ramper à ses pieds pour y exécuter ses ordres.... Ce principe supposé, pour remédier au défaut de la quantité de fluide électrique qui a quelquefois lieu, défaut qui est nuisible à la végétation, il faut élever dans le terrain qu'on veut féconder un appareil nouveau que j'ai imaginé, qui a tout le succès possible et qu'on peut nommer *électro-végétomètre;* il est aussi simple dans sa construction qu'efficace dans sa manière d'agir, et je ne doute point qu'il ne soit adopté par tous ceux qui sont instruits des grands principes de la nature. Cet appareil est composé d'un mât AB, *fig.* 1 (*Pl. A*), ou d'une pièce de bois quelconque, suffisamment enfoui en terre pour qu'il puisse avoir une certaine solidité et résister aux vents.

(Suit la description des précautions à prendre pour la conservation du bois, goudronnage, etc.)

Au haut du mât nous mettons une espèce de console ou support C qui est en fer; l'extrémité pointue sera enfoncée dans

---

([1]) *Loc. cit.*, p. 392 et suiv.

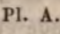
l'extrémité supérieure du mât et l'autre bout du support sera terminé en anneau pour y recevoir un tuyau de verre creux qu'on voit en D, et dans lequel on aura mastiqué une verge de fer qui s'élève en E. Cette verge de fer, qui se termine en pointe par son extrémité supérieure, est entièrement isolée, puisqu'elle tient fortement dans un tube de verre épais, rempli de matière bitumineuse, scellée avec des cendres, de la brique pilée et du verre en poudre, ce qui forme un mastic très-bon et très-approprié à l'objet qu'on s'est proposé. Afin que la pluie ne mouille pas le tuyau de verre D, on a eu soin de souder un entonnoir F de fer-blanc à la verge E; alors celle-ci est toujours isolée. De l'extrémité inférieure de la verge E pend une chaîne G, qui entre dans un second tuyau de verre H, lequel est soutenu par le support I. L'extrémité inférieure de la chaîne dont nous venons de parler repose sur un disque de fer K qui fait partie du conducteur horizontal KLMN. En L est une brisure à charnière, afin de pouvoir tourner à droite ou à gauche la verge de fer LMN; il y en a une autre en Q pour que le mouvement circulaire puisse encore mieux s'exécuter. O et P sont deux guéridons en supports terminés en fourche, où l'on a attaché un cordon de soie bien tendu pour isoler le conducteur horizontal; en N sont plusieurs pointes de fer assez aiguës.

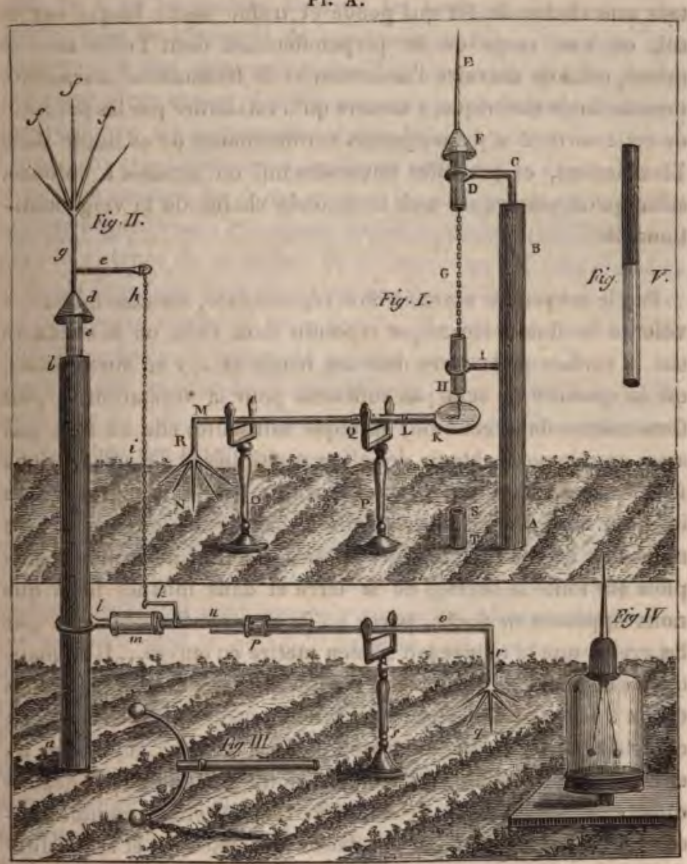
La *fig.* III (*Pl. A*) représente un appareil semblable au premier pour le fond, mais avec quelques différences dans la construction. Je crois inutile de le décrire.

Bertholon continue :

La structure de cet électro-végétomètre bien entendue, on en concevra facilement l'effet. L'électricité qui règne dans l'air sera soutirée par les pointes de l'extrémité supérieure; les expériences électriques les plus décisives prouvent que les pointes ont cette propriété. C'est ce qu'on appelle, en Physique, le pouvoir des pointes. La matière électrique, soutirée par la pointe E ou par celles qui sont marquées *f, f, f*, sera nécessairement transmise par la verge et par la chaîne, parce que l'isolement qu'on a pratiqué à l'extrémité supérieure du mât, empêche qu'elle ne se communique au bois. Le fluide électrique de la chaîne passe au

conducteur horizontal KM ou *no*; ensuite il s'échappe par les pointes qui sont en N et *q*, parce que les pointes qui ont le pouvoir de soutirer ont aussi celui de repousser le fluide électrique, ainsi que l'expérience le démontre. L'usage de cet instrument


Pl. A.



n'est pas plus difficile : supposons qu'il ait été placé au milieu d'un jardin potager, par exemple; en faisant tourner successivement le conducteur horizontal et en retirant l'allonge ou les allonges qu'on y aura mises, on pourra porter l'électricité dans toute la surface du terrain dont nous parlons. L'électricité sou-

tirée de l'atmosphère sera conduite sur toutes les plantes qu'on cultivera, dans les temps où l'on aura observé trop peu d'électricité ([1]) dans les basses régions proches de la superficie de la Terre. Lorsque le fluide électrique de l'atmosphère sera trop abondant, on rendra nul l'effet de notre appareil en K, en mettant une chaîne de fer qui pende et traîne même jusque sur le sol, ou une verge de fer perpendiculaire dont l'effet sera le même, celui de détruire l'isolement et de transmettre insensiblement le fluide électrique, à mesure qu'il est soutiré par les pointes : de cette sorte il n'y aura jamais surabondance de ce fluide dans l'instrument, et son effet deviendra nul ou sensible à volonté, selon qu'on placera ou non la seconde chaîne ou la verge additionnelle..

....

Par le moyen de notre électro-végétomètre, on rassemblera à volonté le fluide électrique répandu dans l'air, on le conduira sur la surface de la terre dans les temps où il y en aura moins, où la quantité ne sera pas suffisante pour la végétation, à plus forte raison dans ceux où, quoique suffisante, elle ne sera pas assez grande pour obtenir des effets multipliés et des productions nombreuses. De cette façon, on aura un excellent engrais qu'on ira pour ainsi dire, chercher dans le ciel, et cet engrais ne sera nullement dispendieux... Cet engrais est celui que la nature emploie sur toute la surface de la terre et dans tous les lieux que nous appelons *en friche*, parce qu'ils ne sont fécondés que par les agents que la nature sait si bien mettre en œuvre... Il ne manquait peut-être, pour mettre le complément aux découvertes utiles qu'on a faites sur l'électricité, que de montrer l'art si avantageux de se servir du fluide électrique comme engrais; alors tous les effets que nous avons prouvés dans notre seconde Partie dépendront de l'influence de l'électricité; tous ces effets, comme l'accélération dans la germination, dans l'accroissement et la production des feuilles, des fleurs, des fruits, leur multiplication, etc., seront produits, même dans les temps où les causes secondes s'y

---

([1]) La *fig.* IV (*Pl. A*) représente l'électromètre à balles de sureau de Cavallo, dont Bertholon se servait pour constater l'état électrique de l'atmosphère.

opposeraient, par l'accumulation du fluide électrique que nous avons eu l'art de rassembler sur les portions de la surface de la terre où nous cultivons des plantes plus particulièrement consacrées à nos besoins.

Cet appareil ayant été élevé par mes soins au milieu d'un jardin, on a vu les plantes diverses, les herbages, les fruits, plus hâtifs, plus multipliés et de meilleure qualité... Ces faits sont analogues à une observation que j'ai faite ; c'est que les plantes croissent mieux et sont plus vigoureuses autour des paratonnerres, lorsqu'il y en a quelques-uns et que le local permet leur développement [1] ; ils servent à expliquer comment la végétation est si vigoureuse dans les forêts et dans les plus grands arbres, dont la cime orgueilleuse s'élève avec autant de majesté dans l'air à une grande distance de la surface de la Terre ; ceux-ci vont chercher le fluide électrique bien plus haut que les plantes moins élevées ; les extrémités aiguës de leurs feuilles, de leurs rameaux et de leurs branches sont autant de pointes que la nature leur a départies dans le jour de sa munificence pour soutirer le fluide électrique de l'air, cet agent si propre à la végétation et à toutes les fonctions des plantes.......... ....

....

Ce n'est pas seulement par le moyen de l'électricité de l'atmosphère rassemblée par des appareils qu'on peut remédier au défaut du fluide électrique si nécessaire à la végétation : l'électricité nommée artificielle peut encore y concourir. Quelque étonnante que soit cette idée et quoiqu'il paraisse peut-être impossible de la réaliser, on verra bientôt que rien n'est plus aisé. Supposons qu'on veuille augmenter la végétation des arbres d'un jardin, d'un verger, sans avoir recours aux appareils destinés à pomper, pour ainsi dire, l'électricité de l'atmosphère, il suffit d'avoir un grand tabouret isolateur représenté en A (*Pl. B, fig.* 11). On peut le faire de deux façons en versant une couche suffisante de poix et de cire fondues sur ce tabouret, dont les bords, étant plus élevés que le milieu, formeront une espèce de caisse ou de moule...

---

[1] L'abbé Nollet avait constaté que l'action de l'électricité statique se transmet par influence à distance sur les objets placés dans le voisinage d'une machine électrique. (L. G.)

On aura soin de placer dessus l'isoloir un baquet de bois rempli d'eau et de faire monter sur ce tabouret un homme armé d'une pompe aspirante en forme de seringue C. Si l'on établit une communication entre l'homme et une machine électrique mise

Pl. B.



en mouvement, l'homme étant isolé, ainsi que tout ce qui est sur le tabouret, pourra, en poussant le piston, arroser des arbres G, G, répandre sur eux une pluie électrique qui portera sur tous les végétaux qui la recevront un principe de fécondité, une vertu

toute particulière, qui a la plus grande influence sur toute l'économie végétale... J'imagine bien qu'on ne doute pas que l'électricité est communiquée à l'eau qui sert à l'arrosement, car il serait facile d'opérer ici la plus ample conviction, puisque, si quelqu'un reçoit sur le visage ou sur la main cette pluie électrique, aussitôt il sent des piqûres électriques, effet des étincelles qui sortent de chaque goutte d'eau........................

Si l'on veut arroser dans un parterre ou dans un jardin des carreaux et plates-bandes de fleurs, ou des planches dans lesquelles on aura semé des graines, où seront des plantes de divers âges et de différentes espèces, rien n'est plus aisé et plus expéditif que le procédé suivant, dont on se formera une idée suffisante en voyant la *fig.* 11 de la *Pl. B.* Sur un chariot AA, on a placé un isoloir, moulé en forme de gâteau, de poix et de résine, comme nous l'avons dit ci-devant; pour plus grande facilité, il n'y a point de pieds à cet isoloir. Le chariot est traîné dans toute la longueur du jardin par un homme ou par un cheval qu'on y a attelé; à mesure qu'on tire le chariot, le cordon métallique *cc* se dévide de dessus la bobine D, laquelle tourne à l'ordinaire. Celle-ci est isolée, soit parce que l'axe mobile est un tube de verre solide, soit parce que le petit équipage qui soutient la bobine est planté dans la masse de résine, dans le cas où l'on voudrait que l'axe fût en fer. L est un support qui sert à empêcher que le fil d'or ou le cordon métallique ne traîne par terre et ne dissipe de cette façon l'électricité, et, de plus, il sert d'isoloir. Pour remplir ce dernier objet, il faut que l'anneau EF dans lequel il passe soit de verre. On peut également, si l'on veut, se servir des isoloirs et supports marqués O, P, S dans les *fig.* 1 et 11 de la *Pl. A.*

Si un jardinier, monté sur l'isoloir, tient d'une main un arrosoir plein d'eau, et que de l'autre il prenne un cordon métallique G, propre à transmettre l'électricité qui vient du conducteur H, par le moyen du fil CC*d*, alors, l'eau étant électrisée, on aura une pluie électrique qui, tombant sur toute la surface des plantes qu'on veut arroser, rendra la végétation plus vigoureuse et plus abondante. Un second jardinier donnera de nouveaux arrosoirs pleins d'eau à celui qui est sur l'isoloir, lorsqu'il aura vidé ceux qu'il tenait, et en peu de temps on pourra arroser un jardin

entier. Ce procédé n'est presque pas plus long que l'ordinaire, et quand même il le serait un peu plus, les grands avantages qu'on en retirera dédommageront bien abondamment de ce petit inconvénient. En répétant plusieurs jours de suite cette opération, soit sur des graines semées, soit sur des plantes qui prennent leur accroissement, on ne tardera pas à en retirer de grands avantages. Ce procédé facile, ainsi que le précédent, a été mis en pratique, je puis l'assurer, et cela avec le plus grand succès. Tous ceux qui continueront à l'éprouver en seront aussi satisfaits que je l'ai été. C'est ainsi que la Physique moderne apprend à commander aux éléments, à se passer d'eux, s'il est permis de parler de la sorte.

Je m'arrête : ces citations suffisent pour faire connaître la méthode proposée il y a près d'un siècle pour soumettre les végétaux à l'influence de l'électricité atmosphérique ou à celle de l'effluve artificielle. Je suis heureux de l'ignorance dans laquelle j'étais des expériences de Bertholon lorsque j'ai entrepris les recherches qui font l'objet de ce Mémoire ; il est bien probable, en effet, que, connaissant les travaux de cet habile physicien et ses vues sur le rôle de l'électricité atmosphérique, j'aurais considéré le sujet comme en partie épuisé. La méthode que j'ai employée, et qui est précisément l'inverse de celle de Bertholon, m'a permis de pousser plus avant l'étude de cette question si intéressante, et j'ai l'espoir d'arriver, par les expériences projetées pour cet été, à jeter quelque lumière nouvelle sur quelques points fondamentaux de la nutrition des plantes, considérées dans leurs rapports avec l'électricité atmosphérique.

MÉMOIRE SUR LES PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DÉVELOPPÉES PAR INFLUENCE DANS DIVERS ÉCHANTILLONS DE NICKEL ET DE COBALT, COMPARÉES A CELLES DU FER;

PAR M. HENRI BECQUEREL,
Ingénieur des Ponts et Chaussées.

CHAPITRE PREMIER.

RÉSUMÉ HISTORIQUE.

Lorsque l'on compare entre elles les attractions ou les répulsions exercées par un aimant puissant sur divers corps peu magnétiques, et principalement sur ceux qui sont appelés *diamagnétiques,* on observe que, pour une même intensité de l'aimant, les effets sont proportionnels à des nombres constants qui caractérisent les diverses substances et mesurent leur *magnétisme spécifique*. La même simplicité ne se retrouve plus lorsqu'on cherche à déterminer le magnétisme spécifique des corps très-magnétiques, tels que le fer, le nickel, le cobalt et leurs composés; les effets varient alors avec la nature, l'état moléculaire, la forme et la masse des substances.

Mon père a montré (¹) que, si l'on forme des petits barreaux en disséminant des parcelles de limailles de fer, de nickel ou de cobalt dans une grande quantité de matière inerte, la cire par exemple, de façon à obtenir un mélange homogène, les effets magnétiques développés dans ces petits barreaux sont proportionnels aux poids de la substance magnétique; mais, si les parcelles de limailles sont suffisamment voisines les unes des autres, les effets magnétiques deviennent beaucoup plus complexes et sont ana-

(¹) BECQUEREL, *Traité complet du Magnétisme*, Ch. II, p. 73.

logues à ceux que présente une masse métallique continue.

On sait que de très-faibles proportions de carbone modifient considérablement les propriétés magnétiques du fer; il en est de même pour le nickel et le cobalt.

Le magnétisme du fer et de l'acier a été l'objet de nombreux et importants travaux. Nous rappellerons seulement ici les résultats principaux qui se rattachent directement au présent Mémoire, et nous ne nous occuperons que du magnétisme temporaire développé par influence dans les corps soumis à l'expérience.

Barlow [1], en approchant d'une aiguille aimantée divers barreaux en fer, en acier et en fonte, de même longueur et de même poids, soumis à l'action magnétique de la Terre, avait obtenu des nombres variables entre 100 pour le fer et 48 pour la fonte.

Mon père [2] a montré qu'en faisant osciller entre les pôles de deux barreaux aimantés des petits barreaux de fer et de fonte, de même longueur et de même poids, le rapport des forces qui font osciller les barreaux est variable avec l'intensité magnétique à laquelle ils sont soumis.

MM. Lenz et Jacobi [3] ont étudié particulièrement les relations entre l'intensité d'un courant électrique produisant l'aimantation et le moment magnétique développé dans des barreaux de fer et d'acier; ils ont principalement cherché l'influence de la longueur et du diamètre de ces derniers.

M. Joule [4], puis M. Müller [5], et après lui divers expérimentateurs ont montré que les effets développés ten-

---

(1) *Philosophical Transactions*, 1822; p. 117.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXXII, p. 72; 1851.
(3) *Poggendorff Annalen*, t. XLVII, p. 225.
(4) *Ann. of El.*, vol. IV, p. 131; 1829.
(5) *Poggendorff Annalen*, t. LXXIX, p. 337; 1850; t. LXXXII, p. 181; 1851.

daient vers un maximum ou un état de saturation dépendant de l'intensité magnétisante et de la forme des barreaux influencés.

D'autres physiciens, parmi lesquels nous citerons MM. Lenz ([1]), Wiedemann ([2]) et Dub ([3]), ont reconnu que les moments magnétiques développés par un courant électrique dans des barreaux de fer ou d'acier ne varient pas d'une manière continue avec l'intensité de ce courant. Pour des intensités graduellement croissantes, le rapport du moment magnétique développé, à l'intensité correspondante du courant électrique, commence par croître jusqu'à un maximum, pour décroître ensuite indéfiniment.

Nous insisterons sur ces points dans le cours de ce Mémoire.

Les résultats obtenus jusqu'ici avec le nickel et le cobalt sont moins concordants.

Gay-Lussac ([4]) avait indiqué les nombres 2 et 1 pour le magnétisme du fer et celui du nickel. Lampadius avait aussi comparé divers échantillons de nickel et de cobalt impurs.

Mon père ([5]) a été conduit à étudier des échantillons de nickel et de cobalt qui se sont trouvés à peu près identiques au fer entre les limites des expériences. Des mélanges de matières inertes et de très-petites quantités de nickel, de cobalt et de fer purs, réduits par l'hydrogène, ont donné sensiblement le même résultat à poids égal.

M. Plucker ([6]) a donné incidemment quelques nombres

([1]) *Bulletin de Saint-Pétersbourg*, t. XIV, p. 364; 1854.

([2]) G. WIEDEMANN, *Galvanismus und Elektromagnetismus*, Bd. II, Ire Partie, § 309.

([3]) *Poggendorff Annalen*, t. CXXXIII, p. 56; 1868.

([4]) *Annales de Chimie et de Physique*, t. XXV, p. 119; 1824.

([5]) *Comptes rendus*, t. XX, p. 1708; 1845.

([6]) *Poggendorff Annalen*, t. XCI, p. 1; 1854.

relatifs au fer, au nickel et au cobalt, et il a montré que, pour des intensités croissantes, les moments magnétiques développés tendaient vers un maximum. Il a conclu de ses expériences que le cobalt devrait paraître plus magnétique que le fer pour les faibles forces, et moins magnétique pour des forces plus grandes. M. Arndsten (1) est arrivé aux mêmes conséquences pour le nickel. Plus récemment, M. Rowland (2) a étudié l'aimantation de deux anneaux, l'un de fer, l'autre de nickel, et a constaté que le magnétisme développé dans le nickel était moindre que dans le fer.

Enfin M. W. Hankel (3) a étudié, comparativement avec le fer, deux très-fortes barres de nickel et de cobalt qui avaient été exposées à Paris en 1867 par M. Winkler. Les résultats qu'il a obtenus s'accordent avec ceux qui se déduisent de quelques-unes de nos séries d'expériences; ils sont relatifs surtout à de fortes aimantations, mais les actions magnétiques n'ont pas varié dans des limites assez étendues pour manifester les phénomènes que nous signalons dans le présent Mémoire.

Les observations que nous venons de rappeler ont été faites à la température ordinaire, variable entre zéro et 30 degrés; à des températures plus élevées, le fer, le nickel et le cobalt présentent, comme on le sait, des particularités très-remarquables. Vers 400 degrés, le nickel perd presque entièrement la faculté d'être attiré par un aimant; le fer subit le même changement vers 600 degrés environ, et le cobalt seulement au rouge blanc. Lorsqu'on passe graduellement de la température ordinaire à ces températures élevées, on n'observe d'abord que de très-faibles change-

---

(1) *Poggendorff Annalen*, t. CIV, p. 606; 1858.

(2) *Philosophical Magazine* [4], vol. XLVI, p. 140; 1873.

(3) W. Hankel, *Berichte über die Verhandlungen des Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, Math. phys. Classe*, 1875, t. II, p. 189; 1876.

ments dans les propriétés magnétiques développées par influence; en général, les intensités magnétiques commencent plutôt par croître un peu, puis elles décroissent très-rapidement dans le voisinage de la température critique. Quand on échauffe ainsi graduellement ces métaux, l'effet de la force coercitive disparaît avant le magnétisme temporaire.

Au moment où cesse l'effet énergique, le fer et le nickel sont encore susceptibles d'être attirés par un fort électro-aimant. Dans un travail encore inédit, mon père a pu comparer les actions magnétiques du fer et du nickel à des températures élevées, en faisant osciller entre les pôles d'un électro-aimant des petits barreaux de même poids suspendus à un fil sans torsion par une chape et un long fil en platine. Les barreaux étaient échauffés par la flamme d'un brûleur à gaz et oscillaient dans l'intérieur d'une capsule en platine portée à l'incandescence, qui évitait autant que possible les perturbations dues aux courants d'air du brûleur. En opérant avec un petit barreau de nickel, décrit au n° 7 du Chapitre III de ce Mémoire, et avec un petit barreau de fer de même forme, de même poids et de même longueur, il a trouvé :

		Intensités magnétiques développées.
Nickel...	A la température ordinaire...	10000,0
	Vers 600 degrés...........	2,4
Fer.....	A la température ordinaire...	10000,0
	Vers 600 degrés...........	30,0

On n'a pu atteindre une température assez élevée pour faire les mêmes expériences avec le cobalt, au delà de la température à laquelle ce métal perd la plus grande partie de ses propriétés magnétiques.

Les nombres qui précèdent sont relatifs aux conditions bien déterminées de l'expérience particulière qui a été

faite; ils peuvent varier avec la forme des substances et l'intensité magnétique à laquelle on les soumet.

Les présentes recherches ont été entreprises dans le but d'étudier un acier de nickel ou plutôt un nickel carburé préparé par M. Boussingault, qui avait eu l'obligeance de nous en remettre un petit barreau. Nous avons profité de cette circonstance pour rassembler le plus d'échantillons possibles de ce métal et pour les comparer entre eux; leur description et leur provenance seront indiquées plus loin. Ces éehantillons, qui provenaient des origines les plus diverses, se sont présentés sous la forme de barreaux ayant les dimensions les plus variées comme section, longueur et poids. Il eût été préférable de pouvoir ramener toutes les substances à des dimensions communes; mais, comme certains barreaux étaient très-petits, on ne pouvait le faire sans perdre la plus grande partie des substances. D'un autre côté, il y avait un grand intérêt à profiter de toute la masse métallique dont on pouvait disposer. Nous nous sommes donc borné à faire fabriquer des petits barreaux de fer ayant même longueur, même forme et même poids que chacun des barreaux de nickel et de cobalt, et nous avons comparé chaque échantillon au barreau de fer correspondant. Lorsque cela a été possible, nous avons pris ces petits barreaux dans un même morceau de fer de Suède très-doux, dont M. Boussingault s'est servi comme type dans ses analyses, et qu'il a très-obligeamment mis plusieurs fois à notre disposition.

D'après M. Boussingault, la composition de cet échantillon est la suivante :

Fer	0,9974
Carbone	0,0009
Silicium	0,0008
Soufre	0,0003
Manganèse et pertes	0,0006
Total	1,0000

Nous nous sommes proposé de faire varier dans des limites très-étendues l'action magnétique à laquelle nous soumettions les substances à étudier. Les conditions particulières où nous nous trouvions d'avoir à examiner des échantillons de dimensions très-différentes nous ont conduit à employer diverses méthodes de comparaison, dont plusieurs sont nouvelles, et sur lesquelles nous allons donner d'abord quelques développements.

CHAPITRE II.

MÉTHODES D'OBSERVATION.

La comparaison des propriétés magnétiques temporaires développées par influence dans divers barreaux est toujours très-délicate à effectuer, les phénomènes d'influence se compliquant d'une distribution magnétique variable avec la forme, le poids et la longueur des divers barreaux.

Il est donc nécessaire de se placer dans des conditions où cette distribution soit, autant que possible, la même pour les divers barreaux à comparer. Tel est l'objet des méthodes d'observation dont la description va suivre.

1. *Méthode des oscillations.*

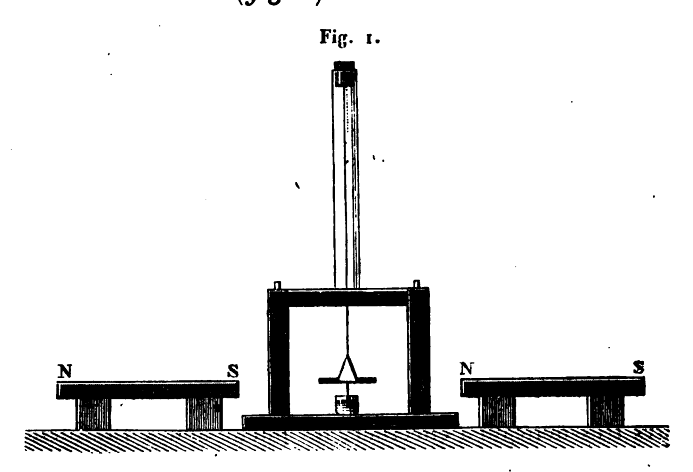
La disposition expérimentale qui rend sensible l'action des plus faibles forces est la méthode des oscillations.

Les substances ont été étudiées sous la forme de barreaux cylindriques ou prismatiques ayant, deux à deux, rigoureusement même poids et même longueur, les autres dimensions étant peu différentes, en raison du peu de différence des densités du fer, du nickel et du cobalt.

Les barreaux étaient substitués l'un à l'autre dans une petite chape en papier, très-légère, suspendue à un fil de cocon ou à un faisceau de fils suivant le poids à supporter,

et ils pouvaient osciller librement entre les pôles de deux barreaux aimantés (*fig.* 1).

Fig. 1.



Ces barreaux aimantés, dont on faisait varier la distance pour opérer avec diverses intensités magnétiques, ont été placés tantôt perpendiculairement au méridien magnétique, tantôt parallèlement à cette direction. Dans le premier cas, l'influence terrestre sur le temps des oscillations est nulle ; dans le second, l'action terrestre s'ajoute ou se retranche d'une manière constante à l'action des barreaux aimantés.

Pour éliminer l'influence perturbatrice d'une aimantation préalable, chaque petit barreau étudié était soumis à deux observations, en les retournant bout pour bout, et la moyenne des forces qui faisaient osciller le barreau dans les deux cas donnait sensiblement la force sous l'influence de laquelle le barreau eût oscillé s'il eût été exempt de toute aimantation permanente préalable.

La torsion du fil de suspension a été reconnue négligeable dans tous les cas.

Les oscillations étaient observées au moyen d'une petite lunette à réticule qui visait des repères fixes tracés sur les

barreaux. Enfin, pour amortir les oscillations pendulaires dues à la pesanteur, la chape en papier était munie d'un petit fil de cuivre ou d'une paille qui plongeait verticalement dans de la glycérine.

Dans ces conditions, on sait que les petites oscillations du barreau mobile sont isochrones et que le temps d'une oscillation peut donner une mesure de la force qui fait osciller le barreau, à la condition que les directions des forces dues aux réactions mutuelles de l'aimant fixe et du barreau mobile puissent être considérées comme sensiblement parallèles à chaque instant du mouvement.

Soit F la force sous l'influence de laquelle ont lieu les oscillations, $2l$ la distance des pôles développés par influence dans le barreau mobile, et Σmr^2 le moment d'inertie du barreau par rapport à l'axe d'oscillation. Le temps d'une petite oscillation est donné par la formule connue

$$t = \pi \sqrt{\frac{\Sigma mr^2}{2Fl}},$$

d'où l'on déduit

$$F = \frac{\pi^2 \Sigma mr^2}{2l} \frac{1}{t^2}.$$

En prenant deux barreaux de même longueur, de même poids et de sections peu différentes, Σmr^2 est très-sensiblement le même. Si l'on admet que la distribution magnétique est la même et telle que la distance $2l$ des pôles soit la même dans les deux barreaux, les forces F seront proportionnelles à $\frac{1}{t^2}$, et le rapport inverse des carrés des temps des oscillations donnera le rapport des forces qui font osciller les barreaux. Ces forces sont proportionnelles au produit des masses magnétiques de l'aimant fixe et du barreau mobile, de sorte que les rappots $\frac{1}{t^2}$ représentent

les rapports des masses magnétiques temporaires développées par influence dans les barreaux étudiés.

La limite inférieure de l'action magnétique à laquelle nous avons pu soumettre les substances a été dans chaque cas une intensité telle que le magnétisme développé par influence soit supérieur au faible magnétisme permanent qui reste toujours dans les barreaux étudiés même après un recuit prolongé, car, au-dessous de cette limite, ces barreaux ne peuvent plus osciller dans les deux positions inverses, et les mesures deviennent impossibles. A partir de cette limite inférieure, on a pu faire croître considérablement l'intensité magnétique jusqu'à ce que les oscillations soient tellement rapides, qu'il devenait difficile de les compter avec précision. Comme ces dernières déterminations présentaient un intérêt particulier, nous avons dû chercher le moyen de continuer les mesures pour des intensités plus grandes. Nous avons d'abord augmenté le moment d'inertie du système par une masse additionnelle, qui était un tube en verre rempli exactement de mercure et placé horizontalement dans la chape. Les oscillations, pour une même intensité magnétique, sont devenues beaucoup plus lentes, et l'on a pu faire osciller quelques barreaux entre les pôles d'un gros électro-aimant fortement aimanté.

La masse additionnelle étant la même dans toutes les observations, les rapports n'étaient pas changés, mais on a été bien vite limité par les attractions latérales dues à la puissance de l'aimant actif.

2. *Méthode différentielle.*

La disposition suivante peut servir à comparer les moments magnétiques développés dans deux barreaux soumis à des actions magnétiques qui varient dans les limites les plus étendues. Nous l'avons spécialement appliquée à des actions magnétiques très-énergiques.

Les deux barreaux à comparer ont été fixés horizonta-

lement à un cadre vertical en cuivre. Ils étaient placés l'un au-dessus de l'autre, à 7 ou 8 centimètres de distance, et orientés de façon à faire entre eux un petit angle de 10 degrés environ (*fig.* 2). La partie supérieure du cadre

Fig. 2.

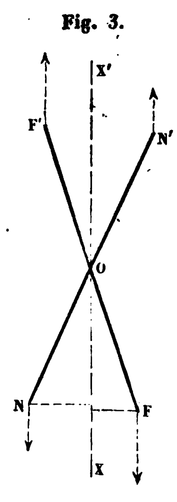


portait un miroir argenté M qui permettait de viser l'image d'une règle divisée et de déterminer avec exactitude les diverses positions angulaires du système. A la partie inférieure était un lest très-lourd, muni de petites ailettes qui plongeaient dans de la glycérine. Le tout était suspendu à un faisceau de fils sans torsion et placé entre les pôles d'un gros électro-aimant que l'on aimantait avec un nombre de couples à acide azotique variable d'un à dix.

Le système était très-sensible à l'action du magnétisme; les ailettes empêchaient toute oscillation et permettaient une lecture rapide de la position d'équilibre; le lest, très-lourd, maintenait dans la position verticale l'axe du système coïncidant avec le fil de suspension, malgré les fortes attractions

latérales. Les armatures de l'électro-aimant étaient de gros prismes en fer doux, ayant pour section un carré de 10 centimètres de côté, et qui étaient environ à 10 centimètres l'un de l'autre. On peut admettre que la distribution magnétique dans ce large champ magnétique reste la même, quelle que soit l'intensité, et les actions peuvent être considérées comme s'exerçant parallèlement à l'axe des armatures. Dans cette hypothèse, la connaissance de la direction de chacun des barreaux et de la position d'équilibre du système permet de déterminer le rapport des moments magnétiques développés par une même influence dans les deux barreaux. En effet, soient ON et OF (*fig.* 3)

Fig. 3.



les projections sur un même plan horizontal des directions des deux barreaux, et OX la direction de la position d'équilibre du système. Cette direction est aussi celle des forces parallèles auxquelles sont soumis les barreaux, de sorte que, pour que l'équilibre ait lieu, on doit avoir, en désignant par N et par F les moments magnétiques développés dans les deux barreaux,

$$N \sin \widehat{NOX} = F \sin \widehat{FOX}.$$

Pour mesurer ces deux angles, il suffit de faire coïncider successivement avec la direction de la ligne des pôles de l'électro-aimant les directions ON et OF et la direction de la résultante OX, et de mesurer les déviations au moyen du miroir de l'appareil. On peut, pour cela, opérer de la manière suivante : on ne place d'abord qu'un seul petit barreau, soit ON ce barreau ; on aimante l'électro-aimant, et le barreau se place axialement ; on lit alors la déviation du miroir. Cela fait, on fixe le second barreau OF dans la position qu'il doit occuper, et l'on étudie pour diverses intensités magnétiques les positions du miroir, c'est-à-dire les directions de la résultante OX des forces appliquées au système solidaire des deux barreaux ; puis, sans toucher au barreau OF, on enlève le premier barreau ON, et pour une aimantation quelconque de l'électro-aimant le barreau OF se place axialement ; sa direction par rapport aux directions précédentes est rigoureusement donnée par le miroir. Pour éviter l'influence d'une petite quantité de magnétisme rémanent dans les barreaux et dans les armatures, ainsi que l'action directrice de la terre, les observations ont été faites en renversant chaque fois le sens du courant dans l'électro-aimant et en prenant la moyenne des deux lectures.

Cette disposition permet de faire rapidement des comparaisons rapportées rigoureusement à la même intensité magnétique pour des valeurs très-variables de cette intensité. Elle a servi principalement à montrer directement l'inégale variation du moment magnétique dans divers barreaux pour des intensités différentes ; en effet, si le mode de variation des moments magnétiques avec l'intensité était le même dans les deux barreaux, la direction de la résultante OX serait indépendante de l'intensité, tandis que la disposition expérimentale précédente montre que la résultante OX se déplace par rapport à ON et à OF. Pour des intensités croissantes,

ce déplacement passe par un minimum et un maximum, et donne lieu à des rétrogradations successives de la direction OX.

Nous nous proposons d'appliquer une disposition analogue à l'étude du développement du magnétisme aux températures élevées, car on obtiendrait ainsi le rapport des moments magnétiques développés dans deux barreaux pour des conditions d'influence magnétique et de température qui peuvent être rigoureusement les mêmes ([1]).

Cette méthode cependant soulève plusieurs objections; ce sont : 1° les suppositions que nous avons faites relativement à la distribution magnétique entre les armatures de l'électro-aimant; 2° la position oblique des barreaux par rapport à la direction de l'action magnétisante, position qui pourrait faire craindre que la distribution magnétique dans ces barreaux ne se fît obliquement par rapport à leur axe de symétrie, ce qui compliquerait le phénomène à étudier; 3° le voisinage mutuel des deux barreaux, qui réagissent l'un sur l'autre et peuvent modifier inégalement le développement du magnétisme dans chacun d'eux. Dans nos expériences, ces perturbations étaient faibles, comme le prouve la concordance des résultats obtenus par cette méthode et par la méthode des oscillations.

Nous avons cherché à appliquer à ces recherches une méthode à l'abri de ces objections, et qui nous permît de déterminer à la fois l'intensité de l'action magnétisante et le magnétisme développé dans les barreaux, détermination que nous ne pouvions faire avec les méthodes décrites plus haut.

([1]) M. Plücker (*Pogg. Ann.*, t. LXXXVI, p. 11; 1852) a fait une expérience qui consiste à mettre en croix un barreau de fer mince et un plus gros barreau d'acier, et il a constaté que, suivant l'intensité magnétique, le système s'orientait dans la direction du barreau de fer ou dans celle du barreau d'acier.

L'emploi d'un magnétomètre, comme l'ont fait MM. Lenz et Jacobi, et M. Muller, n'était pas applicable à l'étude de barreaux aussi petits et aussi variés que ceux que nous possédions.

Nous avons réalisé une disposition dont le principe est intéressant à citer et qui est applicable à de faibles forces magnétiques. On suspend le barreau à étudier dans un petit étrier en aluminium muni d'un miroir, de façon à pouvoir faire osciller le système sous l'action combinée de la terre et d'un barreau aimanté ou d'un électro-aimant dont la ligne des pôles fait avec la direction terrestre un petit angle, et l'on détermine en même temps, au moyen du miroir, les angles que fait la position d'équilibre du système mobile avec la direction de l'action magnétique terrestre et la direction de l'action magnétisante. Connaissant les directions de ces deux forces et celle de leur résultante, il est facile d'en déduire les grandeurs relatives de toutes les forces du système et de mesurer ainsi le rapport de l'intensité magnétique à laquelle est soumis le barreau à l'intensité magnétique terrestre. Le barreau étudié fait fonction d'un véritable magnétomètre et donne en valeur absolue l'intensité magnétique à laquelle il est soumis; d'autre part, le temps d'une oscillation de ce barreau mesure le moment magnétique développé par influence. Malheureusement les plus faibles attractions latérales, en déplaçant même très-peu l'axe d'oscillation par rapport au centre de gravité, donnent lieu à de graves perturbations, et l'on est réduit à ne soumettre les barreaux qu'à des actions très-faibles. Cet inconvénient nous a fait renoncer, pour le moment, à l'usage de cette méthode.

Nous nous sommes définitivement arrêté à l'emploi de la balance électromagnétique.

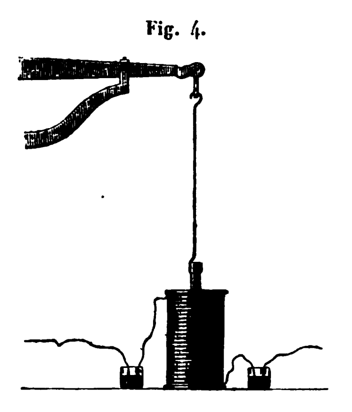
3. *Balance électromagnétique.*

L'appareil qui nous a servi dans la plupart de nos déterminations est la balance électromagnétique imaginée par mon grand-père ([1]) et le même appareil dont il a fait usage.

Le fléau de cette balance est en cuivre, ainsi que les diverses pièces de l'appareil, à l'exception des couteaux, qui sont en acier. On a vérifié préalablement que l'influence magnétique sur les couteaux en acier était absolument négligeable. La balance est sensible à 1 milligramme et a l'avantage de pouvoir supporter des poids relativement très-considérables.

Les barreaux à étudier étaient suspendus à l'une des extrémités du fléau et plongeaient verticalement dans une bobine magnétisante; ils étaient équilibrés par une tare convenable. On faisait alors passer dans la bobine un courant électrique dont l'intensité était mesurée à chaque

Fig. 4.

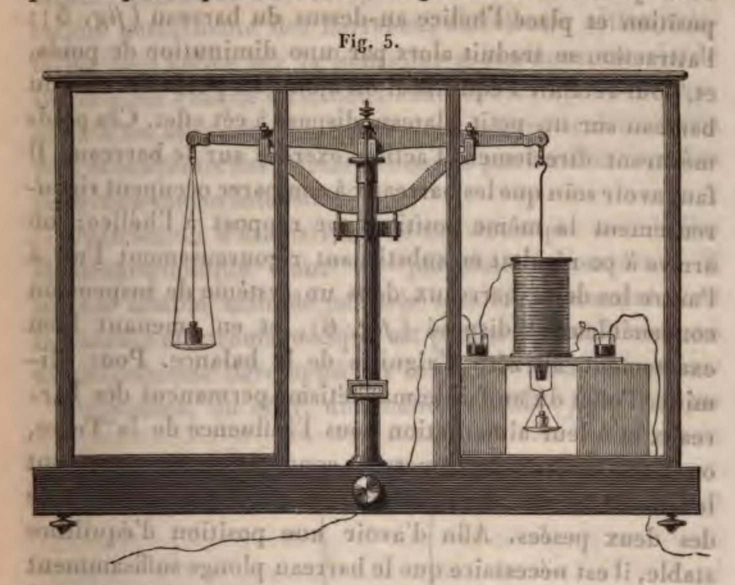


instant par une boussole des sinus; le barreau était attiré vers le centre de la bobine, et l'on rétablissait l'équilibre

([1]) Becquerel, *Traité d'électricité et de magnétisme*, t. V, p. 20; 1837.

par des poids qui mesuraient la grandeur de l'attraction.

Fig. 5.



Nous avons opéré de deux manières; dans nos premières séries, nous mettions l'hélice au-dessous du barreau (*fig.* 4),

Fig. 6.



de sorte que, pour rétablir l'équilibre, il fallait ajouter des poids du côté de la tare; afin de n'avoir pas à tenir compte

de la justesse de la balance, nous avons modifié cette disposition et placé l'hélice au-dessus du barreau (*fig.* 5); l'attraction se traduit alors par une diminution de poids, et, pour rétablir l'équilibre, on ajoute les poids du côté du barreau sur un petit plateau disposé à cet effet. Ces poids mesurent directement l'action exercée sur le barreau. Il faut avoir soin que les barreaux à comparer occupent rigoureusement la même position par rapport à l'hélice; on arrive à ce résultat en substituant rigoureusement l'un à l'autre les deux barreaux dans un système de suspension convenablement disposé (*fig.* 6), et en amenant bien exactement au zéro l'aiguille de la balance. Pour éliminer l'effet dû au faible magnétisme permanent des barreaux et à leur aimantation sous l'influence de la Terre, on faisait toujours deux mesures consécutives en renversant le sens du courant dans l'hélice, et l'on prenait la moyenne des deux pesées. Afin d'avoir une position d'équilibre stable, il est nécessaire que le barreau plonge suffisamment dans l'hélice, de façon qu'un même point puisse être attiré par diverses spires et repoussé par d'autres.

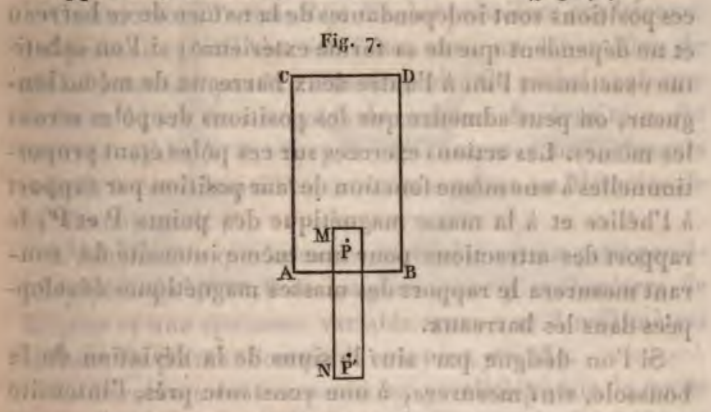
Chaque série d'expériences était exécutée sans toucher au barreau suspendu, et l'on faisait seulement varier l'intensité du courant électrique dans les bobines. Comme dans les diverses séries les intensités du courant ne repassaient pas exactement par les mêmes valeurs, nous avons tracé des courbes représentatives des expériences en prenant pour abscisses les intensités mesurées par la boussole et pour ordonnées les poids magnétiques observés. Ces courbes permettent de ramener les résultats comparatifs à une même intensité, avec une approximation égale à celle des mesures directes. Enfin, nous ferons remarquer qu'il faut avoir soin de faire croître graduellement les intensités du courant électrique, sinon les superpositions d'aimantations alternativement directes et inverses très-différentes peuvent troubler les résultats obtenus. Aussi, pour éli-

miner les causes d'erreur pouvant tenir soit à l'aimantation permanente des barreaux, soit à une action très-faible de l'hélice sur la boussole, avons-nous eu soin de tracer pour chaque série deux courbes correspondant chacune à un sens déterminé de l'aimantation, et nous avons pris la moyenne des nombres donnés par les deux courbes pour une même intensité.

L'attraction d'un barreau de fer doux par une hélice électromagnétique étant un phénomène complexe, il nous a semblé utile de montrer que l'effet mesuré dans la balance électromagnétique est proportionnel à la masse du magnétisme développé par influence dans le barreau.

Supposons, en effet, une hélice ABCD (*fig.* 7) et un

Fig. 7.



barreau de fer doux MN, dont l'axe coïncide avec l'axe de l'hélice, et soumis à l'influence de cette hélice : tous les points n'étant pas à la même distance des diverses spires de l'hélice, l'action totale sera différente sur chacun d'eux et la ligne neutre de l'aimant temporaire ainsi formé sera plus rapprochée de l'extrémité M, voisine de l'hélice, que de l'extrémité opposée. Quelle que soit, du reste, la distribution du magnétisme sur le barreau, on peut toujours supposer toutes les masses magnétiques réunies en deux points P et P', qui sont les pôles de l'aimant tem-

poraire formé, et les masses magnétiques de ces points sont égales et de signe contraire.

Les actions de chaque spire sur ces points tendent à porter l'un des pôles à droite du courant, l'autre à gauche, et l'équilibre a lieu lorsque le milieu du barreau coïncide avec le milieu de l'hélice. Cette position d'équilibre est stable, et, dans ce cas, les pôles P et P' sont à la même distance des extrémités du barreau. Pour les diverses autres positions relatives de l'hélice et du barreau, les pôles P et P' sont situés à des distances inégales des extrémités. Les positions des pôles étant intimement liées aux distances mutuelles des diverses spires de l'hélice et des diverses tranches du barreau, il est permis de supposer que ces positions sont indépendantes de la nature de ce barreau et ne dépendent que de sa forme extérieure; si l'on substitue exactement l'un à l'autre deux barreaux de même longueur, on peut admettre que les positions des pôles seront les mêmes. Les actions exercées sur ces pôles étant proportionnelles à une même fonction de leur position par rapport à l'hélice et à la masse magnétique des points P et P', le rapport des attractions pour une même intensité du courant mesurera le rapport des masses magnétiques développées dans les barreaux.

Si l'on désigne par $\sin i$ le sinus de la déviation de la boussole, $\sin i$ mesurera, à une constante près, l'intensité magnétisante, de sorte que, en désignant par m la masse magnétique développée dans les barreaux et par p le poids qui mesure l'attraction dans la balance, on pourra représenter m par $\frac{p}{\sin i}$. On voit également que le rapport $\frac{p'}{p}$ des attractions exercées sur des barreaux de nickel et de fer de même longueur est égal au rapport $\frac{m'}{m}$ des masses magnétiques développées dans les deux barreaux.

CHAPITRE III.

MESURES EXPÉRIMENTALES.

Les déterminations faites sur les divers échantillons n'étant pas directement comparables entre elles, il nous a semblé que la meilleure manière de présenter les résultats était de réunir les expériences relatives à un même échantillon, en indiquant en même temps sa provenance et ses propriétés physiques.

1. *Nickel cémenté de M. Boussingault.*

Comme nous l'avons déjà dit, les premières expériences du présent travail ont été faites avec un échantillon de nickel cémenté par M. Boussingault. Ce nickel renferme environ 0,011 de son poids de carbone. Sa densité a été trouvée égale à 8,25; pour les autres renseignements relatifs à cet échantillon, nous renvoyons au Mémoire de M. Boussingault (¹).

L'échantillon que nous avons étudié est un petit parallélépipède de $46^{mm},8$ de longueur, sur 7 millimètres de largeur et une épaisseur variable entre 2 et 3 millimètres suivant les points. Son poids exact est $7^{gr},337$.

Ce barreau a été comparé à un parallélépipède de fer de Suède doux et pur, de même poids, de même longueur et même largeur, ce qui a exigé une épaisseur moyenne un peu plus grande que celle du nickel cémenté, la densité du fer de Suède employé étant 7,8 (*voir* p. 232).

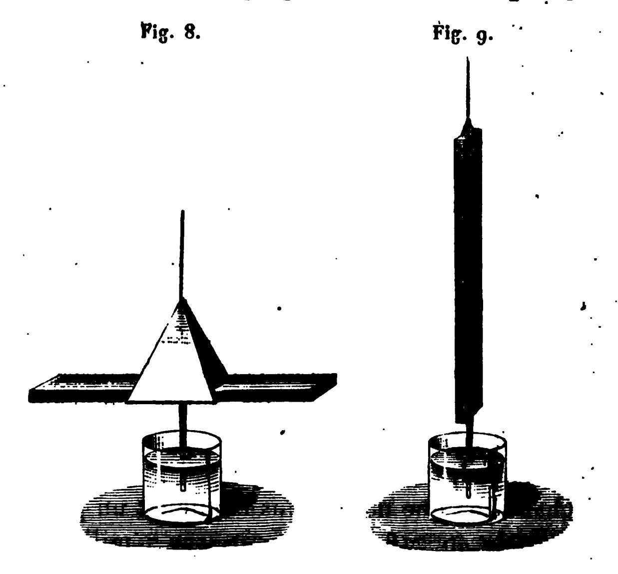
Ces deux barreaux ont été recuits plusieurs fois au rouge sombre pendant le cours des expériences, afin de faire disparaître l'aimantation permanente due à la force coercitive de chacun d'eux. Le nickel cémenté a une force coercitive

(¹) *Comptes rendus*, t. LXXXVI, p. 511.

assez considérable; le fer de Suède a, au contraire, une force coercitive très-faible.

On a étudié ces barreaux par les diverses méthodes indiquées plus haut, et l'on a fait une détermination particulièrement intéressante en faisant osciller les barreaux d'abord autour d'un axe perpendiculaire à leur plus grande

Fig. 8. Fig. 9.



longueur (*fig.* 8), puis autour d'un axe parallèle à cette plus grande longueur (*fig.* 9).

Méthode des oscillations. — Dans les Tableaux qui suivent, les temps des oscillations sont déduits chacun de plusieurs mesures où l'on comptait le temps de 10, 20, 50, 100 ou 200 oscillations, suivant leur durée. Les nombres d'une même ligne horizontale correspondent à une même position des aimants, c'est-à-dire à une même intensité magnétisante.

Nickel cémenté et fer de Suède oscillant horizontalement entre les pôles de deux barreaux aimantés (fig. 8).

FER DE SUÈDE.			NICKEL CÉMENTÉ.			RAPPORTS des forces qui font osciller le NICKEL et le FER pour la même intensité.
TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE des valeurs de $\frac{1}{t^2}$.	TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE des valeurs de $\frac{1}{t'^2}$.	
1re position.	2e position. Barreau retourné.		1re position.	2e position. Barreau retourné.		
s	s		s	s		
12,120	22,800	0,004373	19,385	20,925	0,002473	0,565
5,730	13,660	0,01791	10,630	11,870	0,007974	0,445
2,190	3,320	0,14861	3,620	4,270	0,06557	0,455
2,335	2,825	0,15340	3,545	3,835	0,07280	0,474
0,995	1,087	0,9365	1,397	1,425	0,5015	0,535
0,585	0,590	2,8964	0,737	0,772	1,7580	0,607
0,304	0,313	10,5145	0,345	0,375	7,3063	0,695
0,225	0,232	19,1660	0,272	0,272	13,5160	0,705
0,189	0,196	27,0175	0,223	0,235	19,0700	0,706
0,141	0,150	47,3720	0,175	0,175	32,6530	0,689

Nous avons fait plusieurs séries à la suite de celles-ci, mais la difficulté de compter des oscillations si rapides, la tension considérable du fil et les attractions qui résultent du grand rapprochement des aimants et des barreaux mobiles ne permettent plus de compter sur la même précision.

Mêmes barreaux oscillant suivant un axe parallèle à leur plus grande longueur (fig. 9).

FER DE SUÈDE.			NICKEL CÉMENTÉ.			RAPPORTS des forces qui font osciller le NICKEL et le FER pour la même intensité.
TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE des valeurs de $\frac{1}{t^2}$.	TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE des valeurs de $\frac{1}{t'^2}$.	
1re position.	2e position. Barreau retourné.		1re position.	2e position. Barreau retourné.		
s	s		s	s		
0,7380	0,7530	1,7888	0,7805	0,9480	1,5212	0,851
0,1878	0,1945	27,3817	0,2000	0,2220	22,6745	0,828

Nickel cémenté et fer de Suède oscillant horizontalement entre les pôles du gros électro-aimant du Muséum.

INTENSITÉS.	FER DE SUÈDE. Temps d'une oscillation. 1er sens du courant.	FER DE SUÈDE. Temps d'une oscillation. 2e sens du courant.	FER DE SUÈDE. Moyenne des valeurs de $\frac{1}{t^2}$.	NICKEL CÉMENTÉ. Temps d'une oscillation. 1er sens du courant.	NICKEL CÉMENTÉ. Temps d'une oscillation. 2e sens du courant.	NICKEL CÉMENTÉ. Moyenne des valeurs de $\frac{1}{t^2}$.	RAPPORTS des forces qui font osciller le NICKEL et le FER.
1° *Barreaux suspendus seuls, sans surcharge.*							
Sous l'influence du magnétisme rémanent dans l'électro-aimant...	s 0,9720	s 1,018	1,0117	s 1,3310	s 1,5740	0,4840	0,478
1 élément Bunsen..............	0,1450	0,1577	43,8860	0,1732	0,1930	30,0810	0,685
2° *Le système est chargé d'un lest formé d'un tube plein de mercure.*							
Magnétisme rémanent dans l'électro-aimant. Sans surcharge.........	1,420	1,6430	0,4332	2,0820	2,6240	0,1879	0,434
Magnétisme rémanent dans l'électro-aimant. Système chargé.........	5,235	5,9200	0,0325	6,7350	9,5300	0,01654	0,508
1 élément Bunsen. Système chargé.	0,5155	0,5700	3,4205	0,6390	0,7040	2,2330	0,653
2 » »	0,2500	0,2527	15,8270	0,3325	0,3360	8,9014	0,562
3 » »	0,1665	0,1692	35,5010	0,2385	0,2415	17,363	0,489
4 » »	0,1090	0,1135	80,8970	0,1997	0,2005	24,969	0,309
5 » »	0,1012	0,1012	97,5460	0,1720	0,1720	33,802	0,347
6 » »	0,0915	0,0915	119,4420	0,1735	0,1735	33,220	0,278

Les oscillations du système chargé, sous l'influence de la torsion seule, avaient une durée de 60 secondes; la force de torsion serait donc représentée dans les Tableaux par 0,0003 et peut être regardée comme négligeable.

L'électro-aimant était orienté à peu près perpendiculairement au méridien magnétique, et la faible influence terrestre était éliminée par les deux mesures faites en renversant le sens du courant électrique dans l'électro-aimant. On remarquera dans le Tableau que le système sans surcharge et le système surchargé, placés dans les mêmes conditions, ne donnent pas le même rapport. Les conditions de l'expérience n'ont pas permis de reconnaître la cause de cet écart. Enfin, on observera que pour les fortes intensités les attractions latérales et la rapidité des oscillations ne permettent plus de compter sur le second chiffre décimal du rapport; en effet, la moindre erreur sur le temps t, qui est très-petit, modifie considérablement le nombre $\frac{1}{t^2}$, qui est très-grand.

Cette seconde série ne peut donc qu'indiquer la marche générale du phénomène, c'est-à-dire, dans ce cas, la décroissance continue des nombres inscrits dans la dernière colonne. Ce même fait a été vérifié également par la méthode différentielle décrite plus haut.

Application de la méthode différentielle aux deux barreaux de nickel cémenté et de fer de Suède. — Le système était suspendu entre les pôles du gros électro-aimant du Muséum d'Histoire naturelle. Soient AB la position de la règle divisée (*fig.* 10), O l'axe de rotation du système, OF la direction correspondant au barreau de fer, ON celle du barreau de nickel, OR la direction de la position d'équilibre, OX la perpendiculaire à la règle divisée passant par le point O et tombant sur la division 250 de la règle, OY la bissectrice de l'angle FON.

On mesure les angles

$$FOX = A'', \quad NOX = A' \quad \text{et} \quad ROX = \varphi.$$

Posons

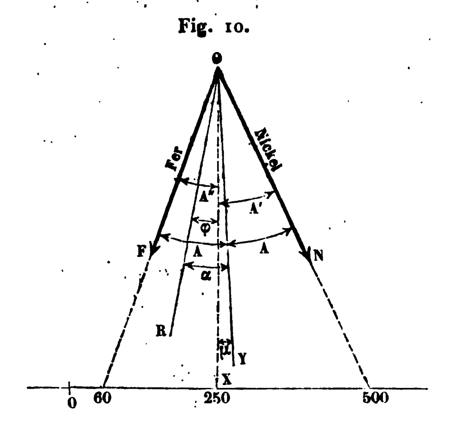
$$A' + A'' = 2A, \quad 2\mu = A' - A'' \quad \text{et} \quad \alpha = \varphi + \mu.$$

Le rapport R des moments magnétiques développés dans les deux barreaux de nickel et de fer est

$$R = \frac{\sin(A - \alpha)}{\sin(A + \alpha)}.$$

Les directions OF et ON ont été déterminées chacune en

Fig. 10.



renversant le sens du courant pour éliminer l'action directrice de la Terre.

On a obtenu :

Fer de Suède. $\left\{\begin{matrix} 59,4 \\ 60,3 \end{matrix}\right\}$ 59,85. Nickel. $\left\{\begin{matrix} 465,0 \\ 465,7 \end{matrix}\right\}$ 465,35.

La distance OX de la règle au miroir a été trouvée égale à 1087. On en déduit facilement

$$A' = 5^\circ 34',66, \quad A'' = 4^\circ 56',14, \quad A = 5^\circ 15',9, \quad \mu = 19',3.$$

Le Tableau suivant résume les observations :

NOMBRE d'éléments Bunsen aimantant l'électro-aimant.	DIRECTIONS DE LA RÉSULTANTE.		RAPPORT R des moments magnétiques développés dans le nickel et le fer.
	1er sens du courant.	2e sens du courant.	
1	187,3	211,2	0,524
2	193,9	201,2	0,512
4	175,1	176,9	0,399
6	159,2	159,9	0,317
8	144,1	144,9	0,264
10	139,0	139,8	0,242

Enfin, les mesures avec la balance électromagnétique ont donné, pour les mêmes barreaux, les résultats suivants.

Les intensités magnétiques sont mesurées par les sinus des déviations de la boussole ; nous appellerons *poids magnétiques* les poids qui mesurent l'attraction magnétique des barreaux par l'hélice ; ces poids sont exprimés en milligrammes.

sin *i*.	POIDS MAGNÉTIQUES.		RAPPORTS des poids correspondant au nickel et au fer.
	Fer de Suède.	Nickel cémenté.	
0,1475	265	188	0,709
0,2669	912	575	0,630
0,4250	2340	1359	0,580
0,5469	4000	2034	0,508
0,6538	5785	2673	0,461

En résumé, on voit que le rapport des effets magnétiques développés dans l'échantillon de nickel étudié et dans un barreau de fer de Suède de même longueur, même forme et même poids, est variable avec l'intensité de l'action magnétisante. Ce rapport part d'une limite que nous n'a-

vons pu déterminer, commence par décroître, atteint un minimum voisin de 0,44, puis, pour des intensités croissantes, augmente, atteint un maximum voisin de 0,7 et diminue ensuite jusqu'à une limite qui semble voisine de 0,2. Nous avons reconnu le même fait avec les divers échantillons étudiés, et nous en donnons plus loin une explication fondée sur l'inégale saturation magnétique des barreaux.

Les déterminations obtenues en faisant osciller les barreaux autour d'un axe parallèle à leur plus grande longueur ont un intérêt particulier, parce qu'il est permis de supposer que, vu la grandeur de la section par rapport à la longueur perpendiculaire à l'axe d'oscillation, les barreaux sont très-loin de leur état de saturation, et les valeurs trouvées correspondraient, dans cette hypothèse, à des valeurs du rapport qui, pour des intensités croissantes, précéderaient le premier minimum. Nous reviendrons plus loin sur cette question.

2. *Nickel préparé par M. J. Wharton.*

M. J. Wharton (de Philadelphie) a envoyé à l'Exposition universelle de 1878 des échantillons de nickel dans un grand état de pureté. Grâce à l'obligeance de MM. Debray et Friedel, et de M. Blake, commissaire des États-Unis, nous avons pu obtenir deux des échantillons de M. Wharton.

Le premier est une barre carrée d'un métal blanc jaunâtre, dont la cassure ressemble à celle de l'argent, qui s'étire en fils et qui paraît très-doux et homogène. Cette barre a été forgée.

Le second échantillon est une barre ronde dont nous n'avons pu savoir le mode de fabrication; cette barre a pu être courbée sans se briser.

Ces deux échantillons nous ayant donné des résultats

très-intéressants, nous donnerons ici avec détail la série des opérations que nous leur avons fait subir.

1° *Barre carrée.* — L'échantillon étudié a une longueur de 80mm,6 environ et une section moyenne de 6 millimètres de côté. Son poids, au commencement de ces opérations, était de 27gr,055. Nous avons fait fabriquer, avec le fer de Suède de M. Boussingault, un petit barreau carré exactement de même longueur et de même poids, et nous avons comparé le nickel à ce barreau au moyen de la balance électromagnétique. Nous avons ainsi obtenu :

sin *i*.	POIDS MAGNÉTIQUES exprimés en milligrammes. Fer de Suède (à poids égal)	Nickel carré (à poids égal)	RAPPORTS des poids magnétiques du nickel et du fer.
0,16619	1762	843	0,478
0,30320	6135	3280	0,531
0,51976	17990	8640	0,480

Le nickel, soumis aux aimantations successives et alternativement inverses nécessitées par les déterminations précédentes, était resté fortement aimanté. Suspendu horizontalement à un fil de cocon, dans une chape en papier, très-légère, il se dirigeait sous l'action terrestre et oscillait sous cette action. Le fer de Suède était également un peu aimanté. Le temps d'une oscillation pour chacun des barreaux était :

Nickel, barre carrée. . . . . $t = 6^s,16$
Fer de Suède » . . . . $t = 31,32$

L'échantillon de nickel possédait donc une force coercitive considérable ; pour chercher à la faire disparaître, nous avons recuit une première fois le barreau de nickel

en le maintenant au rouge pendant 40 minutes environ. Refroidi lentement, et suspendu de nouveau dans la chape en papier, il oscillait encore sous l'action terrestre, mais le temps d'une oscillation était alors de 46 secondes. Le fer n'avait pas été recuit. En replaçant les barreaux dans la balance électromagnétique, exactement à la place qu'ils occupaient dans la première série, on a trouvé, après le recuit du nickel :

sin i.	POIDS MAGNÉTIQUES. Fer de Suède (non recuit) à poids égal.	POIDS MAGNÉTIQUES. Nickel (carré) (recuit) à poids égal.	RAPPORTS des poids magnétiques du nickel et du fer.
0,04042	110,5	54,5	0,493
0,16763	1836,0	1220,0	0,664
0,57334	21400,0	11300,0	0,528

Après ces opérations, le nickel était de nouveau fortement aimanté. On a fait alors subir aux deux barreaux de nickel et de fer un recuit de six heures; ils ont été fortement oxydés.

Les effets observés étant liés aux phénomènes de saturation, il y avait intérêt à comparer les barreaux ayant même section et même longueur. Nous avons profité de l'oxydation inégale du nickel et du fer pour ramener ces barreaux à des poids proportionnels à leurs densités, en enlevant du reste, avec du papier à l'émeri, tout l'oxyde formé.

Il a donc fallu prendre les densités du nickel et du fer. Nous l'avons fait par la méthode de la balance hydrostatique, et nous avons trouvé :

Nickel (barre carrée recuite six heures). $d = 8,702$
Fer de Suède, barre carrée (recuite six heures. . . . . $d = 7,823$

Les poids des barreaux ramenés au même volume ont alors été :

Nickel, barre carrée .... $p = 26^{gr},806$
Fer de Suède, barre carrée .... $p = 24,097$

En transportant les barreaux dans la balance électromagnétique, dans des conditions identiques à celles des séries précédentes, on a obtenu :

sin *i*.	POIDS MAGNÉTIQUES. Fer de Suède, (1er recuit) à volume égal.	POIDS MAGNÉTIQUES. Nickel carré, (2e recuit) à volume égal.	RAPPORTS des poids magnétiques du nickel et du fer.
0,02937	54,8	25,9	0,472
0,03839	90,4	42,6	0,471
0,08976	507,0	280,0	0,548
0,16935	1800,0	1127,5	0,627
0,32034	6400,0	4785,0	0,747
0,45062	12685,0	8250,0	0,653
0,59037	21650,0	12380,0	0,571

Le nickel s'est trouvé alors presque aussi aimanté qu'avant le premier recuit ; le temps d'une oscillation sous l'action de la Terre était :

Nickel .... $t = 6^{s},74$
Fer de Suède .... $t = 28,90$

Il faut observer que les barreaux, étant plus légers, doivent osciller plus vite que précédemment, pour la même quantité de magnétisme rémanent.

On a soumis alors le barreau de nickel seul à un recuit de quarante-huit heures au rouge blanc, puis, après avoir enlevé l'oxyde formé, on a ramené encore une fois les bar-

reaux au même volume. Les poids ont été très-peu changés. On a eu ainsi :

	gr
Poids du barreau de nickel carré.........	26,618
» de fer de Suède carré....	23,929

Une nouvelle série, dans des conditions identiques aux précédentes, a donné :

sin *i*.	POIDS MAGNÉTIQUES. Fer de Suède (recuit 6 heures) à volume égal.	POIDS MAGNÉTIQUES. Nickel carré (recuit 48 heures) à volume égal.	RAPPORTS des poids magnétiques du nickel et du fer.
0,02094	29,0	15,05	0,519
0,03403	75,5	43,65	0,578
0,09237	548,0	378,5	0,690
0,17307	1887,5	1402,0	0,743
0,32447	6595,0	4929,0	0,747
0,47792	14265,0	9200,0	0,645
0,61222	23400,0	13320,0	0,569

Retirée avec précaution et suspendue aussitôt, la barre carrée de nickel se dirigeait sous l'action de la Terre et faisait :

	s
Une oscillation en......................	10,28
Même barre, après quelques chocs.........	17,015
Même barre, le lendemain, après quelques nouveaux chocs....................	17,14

Le fer a donné également :

	s
Fer de Suède......................	$t = 30,16$
Fer après quelques chocs.............	$t = 31,04$

On voit ainsi comment le recuit a diminué la force coercitive de la barre de nickel et combien est instable une

grande partie du magnétisme qui peut rester dans cette barre, puisque de légers chocs peuvent les faire disparaître.

En résumé, on constate sur cet échantillon l'existence d'un maximum du rapport déjà signalé plus haut, et surtout l'accroissement de la grandeur de ce rapport par les recuits successifs, ce qui tend à faire croire que le barreau a été fortement écroui par un martelage préalable. On observe, en outre, que les résultats à poids égal ou à volume égal avec des barreaux de même longueur sont sensiblement les mêmes.

Nous n'avons pu obtenir des intensités assez faibles et appréciables par la balance pour étudier les barreaux dans le voisinage et en deçà des conditions du premier minimum que présente le rapport des effets magnétiques développés.

2° *Barre ronde.* — Ce cylindre a $80^{mm},4$ de long et environ $5^{mm},7$ de diamètre. Il a été comparé à un cylindre de fer de Suède de même longueur et de même poids. Ce poids a été de $20^{gr},0745$.

Les deux barreaux avaient été préalablement recuits pendant six heures avec les barreaux carrés étudiés précédemment; leurs densités, après ce recuit, ont été trouvées les suivantes :

Nickel (barre ronde)................	$d=8,622$
Fer de Suède (barre ronde)..........	$d=7,845$

La densité du barreau rond de fer de Suède, un peu plus grande que celle du barreau carré, tient à ce que le barreau rond a été forgé de nouveau.

Ces barreaux, comparés dans la balance, dans les mêmes conditions que les barreaux carrés, ont donné les résultats suivants :

sin i.	POIDS MAGNÉTIQUES. Fer de Suède.	Nickel rond.	RAPPORTS des poids magnétiques du nickel et du fer.
	A poids égal.		
0,02559	37,0	22,25	0,601
0,08860	454,9	332,0	0,729
0,16447	1580,0	1187,0	0,751
0,30071	5263,0	3487,5	0,662
0,44307	11325,0	6425,0	0,567
0,55871	18185,0	8850,0	0,487

Le barreau de nickel est resté aimanté; transporté avec soin dans la chape en papier, il faisait, sous l'action de la Terre, une oscillation en $9^s,8$; après avoir frappé le barreau, le temps d'une oscillation est devenu $11^s,7$.

Enfin, nous avons fait recuire une dernière fois cette barre de nickel, nous avons remis les barreaux de fer et de nickel de même poids, et nous les avons fait osciller sous l'action d'un barreau aimanté, placé aussi loin qu'il a été possible pour obtenir une action sensible. On a ainsi trouvé pour cette force très-faible les nombres suivants. Le temps θ d'une oscillation d'un barreau en cuivre de même longueur et de même poids sous l'influence de la torsion seule était 204 secondes. La force de torsion $\frac{1}{\theta^2}$ était donc représentée par 0,00002403.

FER DE SUÈDE. Temps d'une oscillation. 1re position.	2e position.	Moyenne $\frac{1}{t^2}-\frac{1}{\theta^2}$.	NICKEL ROND. Temps d'une oscillation. 1re position.	2e position.	Moyenne $\frac{1}{t^2}-\frac{1}{\theta^2}$.	RAPPORT.
s 20,91	s 17,93	0,00307757	s 33,33	s 25,41	0,00120046	0,3900

Il est à présumer que ce rapport est voisin du minimum.

On voit que les résultats donnés par la barre ronde sont analogues à ceux que donne la barre carrée de même provenance. Il est à remarquer cependant que, la section étant plus petite pour la barre ronde, le maximum du rapport des effets magnétiques développés dans le nickel et dans le fer a lieu avec la barre ronde pour des intensités plus faibles qu'avec la barre carrée.

3. *Barreau de nickel fabriqué par M. Christofle.*

Cette barre est formée d'un métal qui a été fondu ; il est probable qu'elle renferme une notable proportion de carbone, car on a essayé de la forger, et elle s'est brisée en présentant l'aspect d'une *fonte*. Elle a été étudiée sous la forme d'un barreau cylindrique de $72^{mm},1$ de long et de $7^{mm},2$ de diamètre, pesant $24^{gr},710$, et on l'a comparée à un barreau cylindrique de fer de Suède de même longueur et de même poids.

La densité de cet échantillon de nickel a été trouvée égale à 8,271. Étudiée dans la balance électromagnétique, elle a donné des résultats analogues à ceux d'une fonte de fer, comme le montre le Tableau suivant :

sin *i*.	POIDS MAGNÉTIQUES.		RAPPORTS des poids magnétiques du nickel et du fer.
	Fer de Suède.	Nickel.	
0,02676	33,8	14,45	0,428
0,02996	42,5	18,4	0,433
0,09005	377,25	180,0	0,477
0,16619	1315,0	602,5	0,458
0,31151	4620,0	1990,0	0,431
0,44932	9525,0	3760,0	0,395
0,56880	15355,0	5650,0	0,368

4. *Fil de nickel.*

Le fil étudié m'a été remis par M. Gaiffe ; le diamètre de ce fil est $0^{mm},7$ environ, et il a $102^{mm},5$ de long. Il a été comparé, dans la balance électromagnétique, à un fil de fer de même longueur et de même poids.

On a ainsi obtenu :

sin i.	POIDS MAGNÉTIQUES. Fil de fer.	POIDS MAGNÉTIQUES. Fil de nickel.	RAPPORTS des poids magnétiques du nickel et du fer.
0,14610	200,5	41	0,205
0,26735	406,0	100	0,246
0,54800	924,0	244	0,264
0,84645	1530,0	413	0,263

Nous ferons remarquer ici la constance et la faible valeur du rapport inscrit dans la dernière colonne du Tableau précédent.

5. *Barreau cylindrique de nickel donné par M. Menier.*

Cet échantillon est un cylindre de nickel fondu, indiqué comme pur, et qui figurait, en 1867, à l'Exposition universelle, dans les produits de M. Menier. Le poids de ce cylindre est $36^{gr},770$. Il a pour longueur $60^{mm},4$ et pour diamètre 9 millimètres. Il a été comparé à un cylindre de même longueur et de même poids en fer du Berry. Ce fer est très-doux et se trouve couramment dans le commerce.

Le barreau de nickel, malgré son aspect un peu bulleux, est plus dense que le fer. Sa densité apparente est 8,691 et est très-voisine des densités des échantillons de nickel de M. Wharton. Les deux cylindres ont été préalablement recuits au rouge sombre, avant chacune des deux séries d'observations.

On les a fait d'abord osciller entre les deux barreaux aimantés placés à diverses distances, et l'on a obtenu les nombres suivants :

FER DU BERRY.			NICKEL.			RAPPORTS des forces qui font osciller le nickel et le fer.
TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE $\frac{1}{t^2}$.	TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE $\frac{1}{t^2}$.	
1re position.	2e position.		1re position.	2e position.		
s 4,490	s 4,49	0,0496	s 6,575	s 6,990	0,0218	0,439
0,502	0,510	3,906	0,504	0,526	3,775	0,966
0,403	0,407	6,0896	0,412	0,434	5,6001	0,919
0,261	0,270	14,1985	0,272	0,284	12,9575	0,913

Avec la balance électromagnétique, on a trouvé :

sin i.	POIDS MAGNÉTIQUES.		RAPPORTS des poids magnétiques du nickel et du fer.
	Fer du Berry.	Nickel.	
0,04940	88	68,5	0,778
0,14435	585	505	0,863
0,23770	1660	1475	0,888
0,45565	6340	5300	0,830
0,65910	13750	10700	0,781
0,83145	22400	16000	0,714
0,96205	30800	20600	0,668

6. *Barreau de nickel fondu par M. le colonel Caron.*

Ce barreau est un parallélépipède assez gros, fondu au laboratoire de M. H. Sainte-Claire Deville par M. Caron et remis à mon père par ce dernier. Ce parallélépipède pèse $98^{gr},040$; il a $72^{mm},6$ de longueur sur 19 millimètres de largeur, et des épaisseurs un peu différentes, 10 millimètres et $8^{mm},7$ à ses deux extrémités.

Mon père avait demandé autrefois à M. Ruhmkorff de façonner un petit barreau de fer très-doux, ayant même poids, même longueur et même largeur; M. Ruhmkorff a fabriqué ce barreau avec le fer qui lui servait pour ses électro-aimants.

Le barreau de nickel est très-bulleux, sa densité apparente est par suite très-faible : elle a été trouvée égale à 7,426. Malgré les bulles qui peuvent exister dans l'intérieur, le métal semble moins dense que les autres échantillons de nickel déjà étudiés. Il a été comparé au barreau de fer par la méthode des oscillations :

FER DOUX.			NICKEL.			RAPPORTS des forces qui font osciller le nickel et le fer.
TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE $\frac{1}{t^2}$.	TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE $\frac{1}{t^2}$.	
1re position.	2e position.		1re position.	2e position.		
s 2,06	s 2,23	0,21837	s 2,175	s 2,195	0,20947	0,959
0,812	0,821	1,5019	0,846	0,850	1,3906	0,926
0,678	0,698	2,1140	0,690	0,698	2,07645	0,982
0,522	0,522	3,6699	0,550	0,556	3,2703	0,891
0,360	0,365	7,6111	0,382	0,390	6,7138	0,882

Nous ajouterons que ce barreau de nickel a une force coercitive très-faible.

7. *Petit parallélépipède de nickel fabriqué par M. Pechiney.*

Ce petit barreau a été remis à mon père il y a environ trente ans par M. Pechiney, fabricant de maillechort, qui l'a donné comme du nickel pur. Il a été étudié par mon père, notamment dans les déterminations à températures élevées dont nous avons parlé plus haut (p. 231).

C'est un petit parallélépipède à section carrée, de $6^{mm},4$ de côté et de $18^{mm},5$ de long. Il pèse $5^{gr},463$.

On l'a comparé à l'ensemble de deux petits barreaux plats en fer de Suède, qui, réunis, forment un parallélépipède à section carrée de même longueur et de même poids que le barreau de nickel.

Cet échantillon est particulièrement curieux; il paraît doux et homogène et perd la presque totalité de son magnétisme au-dessous du rouge, ce qui caractérise le nickel. Il n'a pas sensiblement de force coercitive.

Sa densité apparente est très-faible; prise par la méthode du flacon à $+15^\circ,76$, elle a été trouvée égale à 7,185, c'est-à-dire moindre que celle du fer. Il semble très-probable que cette masse métallique soit poreuse, tout en paraissant homogène.

Mon père avait trouvé que ce petit barreau avait un magnétisme spécifique à peu près égal à celui du fer. De nouvelles expériences avec la balance électromagnétique n'ont fait que confirmer ce résultat, comme on peut le voir par le Tableau suivant :

sin *i*.	POIDS MAGNÉTIQUES.		RAPPORTS des poids magnétiques du nickel et du fer.
	Fer de Suède.	Nickel.	
0,04739	5,5	5,0	0,91
0,09477	21,0	22,0	1,047
0,17623	75,3	80,0	1,062
0,33106	275,5	286,75	1,041
0,48252	584,4	608,2	1,041
0,60682	927,0	965,0	1,041
0,72498	1322,5	1369,0	1,035
0,80936	1649,0	1706,0	1,034
0,90095	2064,0	2135,0	1,033

Nous ferons observer que cet échantillon de nickel se comporte comme un peu plus magnétique que le fer.

Nous avons cherché également à déterminer le rapport du magnétisme développé dans ce nickel à celui du fer pour

des forces très-faibles, et nous avons fait osciller les barreaux sous l'influence d'un aimant très-éloigné.

Nous avons ainsi obtenu :

FER DE SUÈDE.			NICKEL.			RAPPORTS des poids magnétiques du nickel et du fer.
TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE $\frac{1}{t^2}$.	TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE $\frac{1}{t^2}$.	
1re position.	2e position.		1re position	2e position.		
19,47	11,61	0,0050284	19,06	12,13	0,004774	0,949

On voit donc que, même pour de très-faibles forces, cet échantillon s'écarte très-peu du fer.

8. *Limaille de nickel.*

Nous avons répété quelques-unes des expériences qui ont été faites par mon père sur les limailles des métaux magnétiques.

Au fléau de la balance électromagnétique était suspendue une petite cartouche en papier, plongeant dans l'hélice, et nous avons rempli successivement cette cartouche de poids égaux des limailles à étudier. Dans une première série nous avons étudié les limailles de nickel et de fer.

Dans une seconde série, nous avons comparé des poids égaux d'un mélange de 9 parties de limaille de zinc et de 1 partie soit de limaille de fer, soit de limaille de nickel.

Les densités, un peu différentes, faisaient que la même cartouche était remplie à des hauteurs un peu différentes par des poids égaux des divers mélanges.

La limaille de fer avait été prise sur le même fil de fer qui a été comparé au fil de nickel. La limaille de nickel provenait d'un échantillon remis par M. Pechiney, sous le nom de *nickel d'Allemagne* première qualité.

On a obtenu les nombres suivants :

sin *i*.	POIDS MAGNÉTIQUES. Limaille de fer.	POIDS MAGNÉTIQUES. Limaille de nickel.	RAPPORT.
	PREMIÈRE SÉRIE. — *Limailles pures.*		
0,2672	35,0	17,8	0,509
0,4297	94,0	54,8	0,583
0,5723	173,0	105,0	0,607
0,7192	280,0	167,0	0,596
0,8530	405,0	232,0	0,572
SECONDE SÉRIE. — *Limailles mélangées de 0,9 de limaille de zinc.*			
0,44345	15,75	11,2	0,711
0,62235	32,0	22,8	0,712
0,76195	50,5	36,1	0,721
0,89080	66,0	50,4	0,763

9. *Barreau de cobalt donné par M. Menier.*

Le barreau qui a servi aux expériences suivantes est un cylindre de cobalt, de $66^{mm},2$ de longueur et de 9 millimètres de diamètre. Il pèse $37^{gr},170$. Cet échantillon a été remis à mon père par M. Menier en même temps que le cylindre de nickel étudié plus haut (n° 5).

Il a, comme ce dernier, l'aspect un peu bulleux ; mais il n'en paraît pas moins très-homogène et très-dense. Sa densité a été trouvée égale à 8,105. Il a été comparé à un barreau de même longueur et de même poids pris dans le morceau de fer de Suède qui nous a déjà plusieurs fois servi de type.

En faisant osciller les deux barreaux entre les pôles de deux barreaux aimantés, on a obtenu :

FER DE SUÈDE.			COBALT.			RAPPORTS des forces qui font osciller le cobalt et le fer.
TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE $\frac{1}{t^2}$.	TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE $\frac{1}{t^2}$.	
1re position.	2e position.		1re position.	2e position.		
s 4,245	s 4,360	0,0535	s 4,175	s 6,050	0,0423	0,791
3,197	3,232	0,0967	3,400	3,768	0,0784	0,811
1,160	1,167	0,7431	1,246	1,310	0,6134	0,825
0,462	0,462	4,6851	0,480	0,488	4,2687	0,911
0,312	0,319	10,1334	0,326	0,341	8,9774	0,886

Avec la balance électromagnétique, on a eu :

sin i.	POIDS MAGNÉTIQUES.		RAPPORTS.
	Fer de Suède.	Cobalt.	
0,03461	51,25	40,25	0,785
0,05321	120,0	94,4	0,786
0,16992	1252,5	1167,5	0,932
0,32254	4485,0	3917,5	0,873
0,47894	9920,0	8700,0	0,877

10. *Fil de cobalt préparé par M. H. Sainte-Claire Deville.*

Cet échantillon est un fil de cobalt remis il y a plusieurs années à mon père par M. H. Sainte-Claire Deville. Ce fil a $0^{mm},8$ de diamètre environ et $92^{mm},5$ de longueur. Il a été comparé à un bout de fil de fer de même poids et de même longueur. Ce fil de fer est le même que celui qui a été comparé au fil de nickel.

On a trouvé pour ces fils, avec la balance électromagnétique, les nombres suivants.

sin i.	POIDS MAGNÉTIQUES.		RAPPORTS.
	Fil de fer.	Fil de cobalt.	
0,1515	105	59,8	0,571
0,2720	225	127,2	0,565
0,4616	425	245,0	0,550
0,6311	622	355,5	0,571
0,7959	840	468,7	0,557
0,9396	1040	565,0	0,543

Nous ferons remarquer dans ce Tableau la constance des nombres de la dernière colonne.

11. *Barreau d'acier anglais comparé au fer de Suède.*

Nous avons comparé aux deux barreaux de fer de Suède et de cobalt étudiés au n° 9 un barreau d'acier, appelé dans le commerce *acier anglais*. Ce barreau a même poids que les précédents, $37^{gr},170$, et même longueur, $66^{mm},5$. Les mesures ont été faites, pour la plupart, en même temps et avec les mêmes intensités que pour le barreau de cobalt.

On a obtenu par la méthode des oscillations :

FER DE SUÈDE.			BARREAU D'ACIER.			RAPPORTS des forces qui font osciller l'acier et le fer.
TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE $\frac{1}{t^2}$.	TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE $\frac{1}{t^2}$.	
1re position.	2e position.		1re position.	2e position.		
s 4,880	s 5,380	0,0377	s 5,260	s 7,320	0,0274	0,725
3,197	3,232	0,0968	3,690	3,810	0,0711	0,735
1,160	1,167	0,7431	1,332	1,361	0,5514	0,742
0,462	0,462	4,6851	0,528	0,532	3,5601	0,760
0,312	0,319	10,1334	0,314	0,400	7,6034	0,753
0,234	0,237	17,9560	0,244	0,268	15,2992	0,852

12. *Barreaux d'acier anglais comparés au fer du Berry.*

Nous avons également comparé deux paires de petits barreaux de l'acier précédent et du fer du Berry qui a déjà été étudié plus haut.

Ces barreaux avaient la forme de parallélépipèdes à base carrée et avaient pour dimensions :

Les plus gros barreaux, $60^{mm},4$ de long sur $6^{mm},6$ de côté;

Les plus petits barreaux, 19 millimètres de long sur $3^{mm},5$ de côté.

Ces paires de barreaux, deux à deux de même poids et de même longueur, ont été comparés par la méthode des oscillations.

FER DU BERRY.			ACIER ANGLAIS.			RAPPORTS.
TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE $\frac{1}{t^2}$.	TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE $\frac{1}{t^2}$.	
1re position.	2e position.		1re position.	2e position.		
Expériences avec les plus petits barreaux.						
s 2,020	s 2,280	0,2187	s 2,240	s 2,375	0,1883	0,861
1,060	1,090	0,8658	1,142	1,190	0,7361	0,805
0,752	0,778	1,7074	0,810	0,835	1,4792	0,866
0,177	0,177	31,9190	0,192	0,192	26,9860	0,847
Expériences avec les plus gros barreaux.						
4,120	4,180	0,0581	3,560	10,095	0,0443	0,763
2,030	2,045	0,2409	2,020	3,000	0,1781	0,739
0,785	0,787	1,6176	0,836	0,974	1,2423	0,768
0,256	0,257	15,1980	0,273	0,288	12,7120	0,836

13. *Expériences avec des petits faisceaux de fils de fer.*

Nous avons comparé entre eux pour diverses intensités

des petits faisceaux de fils, formés de bouts de fils de fer et de fils de cuivre de même longueur et de même poids. Ces faisceaux sont renfermés dans de petites cartouches en papier et pèsent le même poids. Ils sont formés comme il suit :

Faisceau n° 1, 1 fil de fer pesant $0^{gr},245$ et 9 fils de cuivre pesant le même poids, disposés symétriquement;

Faisceau n° 5, 5 fils de fer et 5 fils de cuivre de même longueur et de même poids; les fils de fer sont au centre du faisceau;

Faisceau n° 10, 10 fils de fer.

Ces faisceaux ont été comparés entre eux par la méthode des oscillations et par la balance électromagnétique.

On a ainsi obtenu :

FAISCEAU N° 10.			FAISCEAU N° 5.			FAISCEAU N° 1.			RAPPORTS.	
TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE $\frac{1}{t^2}$.	TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE $\frac{1}{t^2}$.	TEMPS D'UNE OSCILLATION.		MOYENNE $\frac{1}{t^2}$.		
1re position.	2e position.		1re position.	2e position.		1re position.	2e position.		$\frac{n^\circ 5}{n^\circ 10}$.	$\frac{n^\circ 1}{n^\circ 10}$.
s 4,860	s 5,065	0,03816	s 5,370	s 6,010	0,03118	s 8,0700	s 8,4800	0,01463	0,819	0,308
1,905	1,957	0,26556	2,155	2,225	0,20842	3,2225	3,2375	0,09585	0,784	0,361
0,488	0,498	4,1626	0,554	0,558	3,2349	0,7580	0,7580	1,74050	0,777	0,418
0,121	0,123	67,3680	0,122	0,125	65,6100	0,1688	0,1701	34,82900	0,974	0,517

Les faisceaux n° 10 et n° 1, comparés par la balance électromagnétique, ont donné :

sin *i*.	POIDS MAGNÉTIQUES.		RAPPORTS.
	Faisceau n° 10.	Faisceau n° 1.	
0,1564	123,5	62,5	0,506
0,2816	422,5	198	0,466
0,4149	938,5	359	0,381
0,5299	1537,5	495	0,321
0,6231	2187,5	611	0,280
0,7103	2510,0	723	0,288

CHAPITRE IV.

DISCUSSION DES RÉSULTATS OBSERVÉS.

1° *Nickel.* — En examinant les Tableaux que nous avons donnés dans le Chapitre précédent, on reconnaît le fait général suivant :

Le rapport des effets magnétiques temporaires développés dans le nickel et dans le fer doux est variable avec l'intensité magnétique à laquelle ces métaux sont soumis. Ce rapport, pour de très-faibles intensités, commence par décroître, passe par un minimum, puis augmente pour des intensités toujours croissantes, atteint un maximum et décroît ensuite jusqu'à une limite inférieure. Les variations dans le rapport considéré correspondent à des variations d'intensité d'autant plus faibles que le diamètre des barreaux soumis à l'expérience est plus petit par rapport à leur longueur. Elles s'observent avec tous les échantillons étudiés lorsqu'on a pu opérer dans des limites d'intensité assez étendues.

Ces échantillons peuvent se partager en deux groupes donnant les mêmes résultats ; ce sont :

1° Les nickels carburés et les nickels forgés, possédant une force coercitive assez grande ;

2° Les nickels fondus et sensiblement purs.

Nous écarterons d'abord le nickel fondu remis par M. Christofle, nickel qui est probablement très-carburé, et dont le rapport au fer passe par un maximum voisin de 0,48.

Le rapport des effets magnétiques temporaires développés dans les échantillons de nickel cémenté et forgé passe d'abord par un minimum voisin de 0,4 lorsque les intensités magnétiques sont très-faibles; ce rapport grandit ensuite avec l'intensité magnétique jusqu'à 0,75 environ, puis décroît jusqu'à une limite voisine de 0,2. Les fils, dans les limites d'intensité auxquelles nous les avons soumis, ont donné constamment cette limite inférieure 0,2.

La variation, qui paraît si complexe, du rapport des effets développés dans les barreaux de nickel et de fer comparés deux à deux correspond à une saturation magnétique inégale des deux métaux. On conçoit en effet que, si le barreau de nickel se sature plus vite que le fer, à partir d'une intensité magnétique déterminée il deviendra un aimant temporaire à peu près constant, alors que le barreau de fer continuera à s'aimanter davantage pour des intensités croissantes. Le rapport considéré diminuera donc à partir d'une certaine limite et tendra vers une autre limite inférieure constante, qui correspondra aux intensités pour lesquelles le barreau de fer sera lui-même saturé. Si les barreaux sont très-longs par rapport à leur section, comme il arrive avec les fils de nickel et de fer, la saturation sera atteinte pour de très-faibles intensités magnétiques, et l'on obtiendra pour ces intensités, de même que pour des intensités plus grandes, un rapport sensiblement constant et égal à la limite inférieure dont nous venons de parler, comme le prouve l'expérience.

Les densités des deux métaux nickel et fer étant différentes, on pouvait craindre que la faible différence de section des

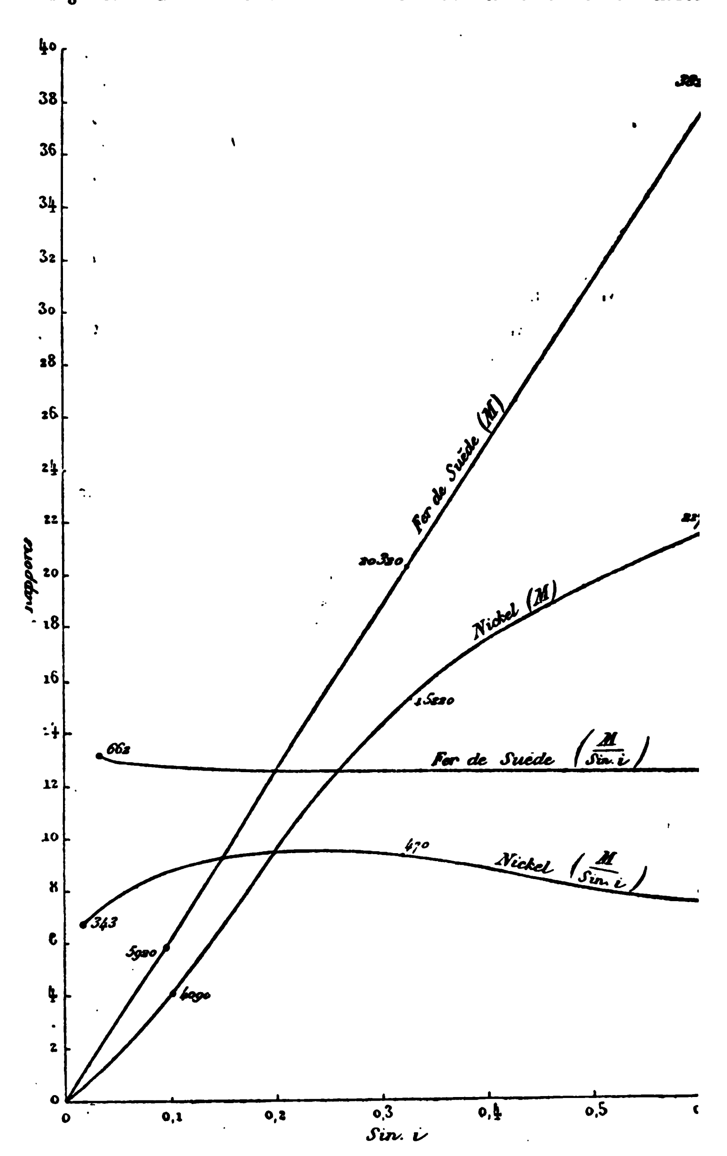
deux barreaux de même longueur et de même poids suffit à expliquer leur inégale saturation; mais on a vu que, en opérant sur deux barreaux d'égal volume, le maximum du rapport s'est présenté dans des conditions très-voisines de celles que l'on avait obtenues pour les mêmes substances à poids égal.

La saturation inégale des deux métaux est d'ailleurs mise en évidence par le Tableau suivant, relatif à la dernière série d'expériences faites dans la balance électromagnétique avec la barre carrée de nickel de M. Wharton et avec la barre de fer de Suède de même longueur et de même volume; les intensités magnétisantes sont mesurées par les sinus des déviations de la boussole.

$\sin i$.	MAGNÉTISME DÉVELOPPÉ dans les barreaux $M = \frac{P}{\sin i}$.		RAPPORTS $\frac{M}{\sin i} = \frac{P}{\sin^2 i}$.		RAPPORTS des quantités de magnétisme développées dans le nickel et dans le fer.
	Fer de Suède.	Nickel.	Fer de Suède.	Nickel.	
0,0209	1387	720	66200	34300	0,519
0,0340	2220	1280	65200	37700	0,578
0,0926	5920	4090	63900	44100	0,690
0,1731	10900	8010	63000	46800	0,743
0,3245	20320	15220	62800	47000	0,747
0,4779	29850	19250	62500	40300	0,645
0,6122	38230	21760	62500	36100	0,569

Nous avons désigné par P les poids magnétiques observés et exprimés en milligrammes (*voir* p. 258). Les courbes ci-jointes (*fig.* 11) ont été construites en prenant pour abscisses les valeurs de $\sin i$ et pour ordonnées les valeurs de M et de $\frac{M}{\sin i}$ qui figurent dans le Tableau précédent, pour le fer et le nickel.

Fig. 11. — Courbes relatives à la barre carrée de nickel de M. Wharto



Ces quatre courbes, de même que le Tableau qu'elles représentent, montrent que le fer est encore assez loin de son point de saturation et que pour les mêmes intensités le barreau de nickel commence à se saturer. Il se sature donc beaucoup plus vite que le fer.

On voit en outre que le magnétisme développé dans le nickel augmente d'abord plus vite que proportionnellement à l'intensité du courant électrique, puis ensuite croît beaucoup moins vite que proportionnellement à cette intensité, et tend vers une constante; le rapport $\frac{M}{\sin i}$ passe, dans cet intervalle, par un maximum qui correspond à peu près au maximum du rapport indiqué dans la dernière colonne du Tableau qui précède.

L'existence d'un maximum du rapport $\frac{M}{\sin i}$ est un fait général qui se présente avec le fer et l'acier, et que nous retrouvons ici avec le nickel. Elle a été constatée dans le fer et l'acier par divers expérimentateurs (1). M. Wiedemann a fait de nombreuses déterminations sur le maximum du rapport du magnétisme développé à l'intensité magnétisante, dans des barreaux de fer et d'acier; il propose d'appeler ce point *wende Punkt*. Nous l'appellerons *point d'inflexion*, parce que ce maximum correspond à un point d'inflexion de la courbe M (*fig.* 11), qui représente le magnétisme développé dans les barreaux. M. Dub a montré en outre que, pour des barreaux de fer semblables et placés dans des hélices semblables traversées par un courant électrique variable, le point d'inflexion dont nous parlons a lieu pour une même intensité du courant. Lorsque des barreaux différents sont placés dans une même hélice, le point

(1) Lenz, *Bullet. de Saint-Pétersbourg*, t. XIV, p. 364; 1854. — Quintus Icilius, *Pogg. Ann.*, t. CXXI, p. 125; 1864. — Oberbeck, *Pogg. Ann.*, CXXXV, p. 74; 1868. — G. Wiedemann, *Lehre vom Galvanismus und Elektromagnetismus*, t. II, 1re Part., § 312; 1874. — Dub, *Pogg. Ann.*, t. CXXXIII, p. 56; 1868.

d'inflexion se manifeste pour des courants d'autant plus faibles que ces barreaux sont plus longs et d'une plus petite section.

Dans le présent Mémoire, nous avons cherché à étudier les barreaux de nickel dans le voisinage du point d'inflexion de la courbe qui représente le magnétisme temporaire développé dans ces barreaux par des intensités magnétiques variables, et les limites d'intensité n'ont pu comprendre toujours le point d'inflexion pour le fer. On peut cependant déduire de ces recherches que, pour tous les échantillons étudiés, ce point d'inflexion se présente dans le fer avec des intensités magnétiques beaucoup plus faibles que dans le nickel.

On vient de voir qu'au point d'inflexion de la courbe qui représente les valeurs de M pour le nickel correspond à peu près le maximum des valeurs du rapport du magnétisme M développé dans le nickel et dans le fer; de même, au point d'inflexion de la courbe relative au fer correspondra un minimum du rapport précédent, et ce minimum aura lieu avec des intensités plus faibles que pour le maximum.

Ce fait a été vérifié avec le nickel cémenté et le fer de Suède; mais les intensités magnétiques étaient trop faibles pour être mesurées dans la balance électromagnétique, et il a fallu nous borner à employer la méthode des oscillations.

Au commencement de ces recherches, et dans le but de multiplier les comparaisons, nous avons fait les séries d'expériences rapportées aux nos 11, 12 et 13 du Chapitre précédent, en comparant des barreaux divers, de fer et d'acier, ainsi que des faisceaux de fils de fer. Les résultats auxquels conduisent ces séries rentrent dans ceux que nous venons de développer; les expériences faites avec des faisceaux de fils de fer se saturant inégalement vite offrent seulement la curieuse coïncidence de donner des rapports

qui sont à peu près les mêmes que les rapports donnés par le petit barreau de nickel cémenté, comparé au fer de Suède.

En résumé, il résulte des considérations qui précèdent que, pour les barreaux de nickel étudiés et compris dans le premier groupe indiqué plus haut, la saturation a lieu avec des intensités magnétiques plus faibles que pour le fer, tandis que le point d'inflexion de la courbe qui représente le magnétisme développé en fonction de l'intensité apparaît au contraire dans le nickel pour des intensités plus grandes que dans le fer.

Le second groupe que nous avons considéré comprend des échantillons de nickel fondu et poreux, dont les propriétés magnétiques sont très-voisines de celles du fer.

L'un d'eux, le nickel fondu donné par M. Menier, est presque aussi dense que le nickel forgé; il a présenté les mêmes phénomènes que les barreaux du premier groupe, avec cette différence que le maximum du rapport des effets développés dans ce barreau et dans un barreau de fer doux du Berry a été très-voisin de l'unité.

Les nickels de M. Caron et de M. Pechiney sont, au contraire, beaucoup moins denses; leur densité apparente est même moindre que celle du fer; ils sont évidemment poreux ou dans un état d'agrégation moléculaire moins compacte que les métaux forgés; ils paraissent assez purs, car ils n'ont pas sensiblement manifesté de force coercitive, même après avoir été soumis à l'action d'un très-fort électro-aimant. Dans les limites les plus étendues que nous ayons pu atteindre, ils sont restés presque identiques au fer au point de vue magnétique. Le petit barreau de nickel fabriqué par M. Pechiney est très-curieux à ce point de vue. Il paraît donner un rapport un peu inférieur à l'unité pour des forces très-faibles, mais il se comporte comme plus magnétique que le fer dans toutes les autres déterminations,

même entre les pôles d'un fort électro-aimant, ainsi que l'avait observé mon père avec ce même barreau.

Il semble que, pour les échantillons où les particules métalliques sont moins voisines les unes des autres, il y ait un rapprochement entre les propriétés magnétiques du nickel et celles du fer.

On sait en outre, d'après les expériences de mon père ([1]), que, si l'on prend les corps à l'état de limailles dont les parcelles sont disséminées dans une masse non magnétique, les résultats donnés par le nickel et le fer sont à peu près semblables. Nous avons fait nous-même avec les limailles les expériences rapportées au n° 8 du Chapitre précédent, et qui montrent comment à l'éloignement mutuel des parcelles métalliques correspondent, dans les comparaisons, des nombres plus voisins de l'unité.

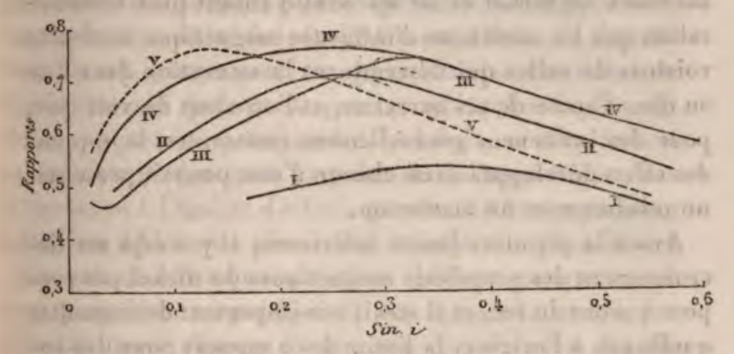
Les effets auxquels donne lieu un même corps dans des états moléculaires différents se manifestent d'une façon remarquable avec la barre carrée de nickel de M. Wharton, dans les recuits successifs auxquels nous l'avons soumise.

Cette barre, sans doute par suite d'un martelage énergique, avait conservé une force coercitive considérable, ainsi que nous l'avons indiqué au n° 2 du Chapitre précédent. Si l'on se reporte aux Tableaux d'expériences, ou mieux si l'on construit les courbes des rapports des effets magnétiques développés dans le nickel et dans le fer pour des intensités croissantes, prises pour abscisses et mesurées par les sinus des déviations de la boussole (*fig.* 12), on voit que l'influence des recuits successifs se manifeste de la manière la plus nette. Les courbes I et II montrent comment un recuit de quarante minutes a rapproché l'un de l'autre les effets donnés par le nickel et le fer; les comparaisons correspondent à des poids égaux. Les mêmes corps, comparés

([1]) Becquerel et Ed. Becquerel, *Traité d'électricité et de magnétisme*, t. III, p. 44; 1856.

à volume égal après un recuit de six heures, ont donné des nombres beaucoup plus grands, comme le montre la courbe III, et enfin un recuit de quarante-huit heures au rouge blanc a modifié considérablement la courbe III pour les intensités inférieures à celle qui donne le maximum du rapport, et, ce maximum une fois atteint (courbe IV), la décroissance du rapport est restée sensiblement la même qu'avant le recuit de quarante-huit heures.

Fig. 12. — Courbes relatives aux barreaux de nickel de M. Wharton. Rapports des effets magnétiques développés dans le nickel et dans le fer.



I. Barre carrée non recuite comparée au fer à poids égal.
II. Barre carrée après un recuit de 40 minutes pour le nickel seulement.
III. Barre carrée après un recuit de six heures comparée au fer recuit, à volume égal.
IV. Barre carrée après un recuit de 48 heures pour le nickel seulement.
V. Barre ronde recuite comparée au fer à poids égal.

La courbe V, que nous avons jointe aux autres courbes, est relative au barreau de nickel rond de M. Wharton et à un barreau de fer de Suède de même longueur et même poids. Ils ont pu être soumis aux mêmes intensités magnétiques que les précédents, et l'on voit que pour ces barreaux, dont la section est plus petite que celles des barreaux carrés, le maximum du rapport s'est présenté pour des intensités magnétiques plus faibles, ce qui est conforme aux faits que nous avons exposés plus haut.

Le recuit, de même que l'éloignement mutuel des parcelles de limailles, a donc pour effet de diminuer la force coercitive, d'augmenter le magnétisme temporaire développé dans le nickel et de le rapprocher de celui du fer doux.

Ces propriétés, pour les barreaux métalliques et pour les barreaux formés de mélanges de limailles, correspondent à des états de plus en plus éloignés de celui de la saturation lorsqu'ils sont soumis à la même influence magnétique.

Les écarts entre les propriétés magnétiques des divers barreaux de nickel et de fer sont d'autant plus considérables que les conditions d'influence magnétique sont plus voisines de celles qui déterminent la saturation dans l'un ou dans l'autre de ces barreaux, et l'on vient de voir que, pour des influences graduellement croissantes, le rapport des effets développés dans chacun d'eux pouvait présenter un minimum et un maximum.

Avant la première limite inférieure, il y a déjà un décroissement des propriétés magnétiques du nickel par rapport à celles du fer, et il serait très-important de connaître quelle est, à l'origine, la limite de ce rapport pour des influences extrêmement faibles ou pour des conditions très-éloignées de celles qui déterminent la saturation.

La forme des divers échantillons et les moyens de mesure dont nous disposions ne nous permettent pas cette recherche dans tous les cas. Cependant, comme nous l'avons déjà dit plus haut (p. 254), les nombres obtenus en faisant osciller autour d'un axe parallèle à leur plus grande longueur le petit barreau de nickel cémenté et le barreau de fer de Suède de même poids peuvent être considérés comme correspondant à un état beaucoup plus éloigné de la saturation que dans toutes les autres déterminations, leur section perpendiculaire à l'axe d'aimantation étant très-grande par rapport à la longueur parallèle à cette direction (p. 248). Les nombres obtenus pour deux intensités croissantes vont

du reste en décroissant, comme nous l'avons reconnu d'autre part pour les intensités inférieures à celles du minimum. Les valeurs du rapport ont été trouvées égales à 0,85 et 0,82, et il est très-remarquable de rapprocher ces nombres de ceux que donnent les limailles très-étendues.

On serait donc porté à penser que, pour des influences magnétiques infiniment faibles, pour des conditions infiniment éloignées de la saturation ou pour des substances dans un état moléculaire tel que les réactions mutuelles des molécules magnétiques soient presque nulles, le rapport des effets magnétiques temporaires développés dans des molécules de nickel et de fer est voisin de l'unité. Mais on ne saurait conclure cependant des diverses considérations qui précèdent que les molécules du fer, du nickel, auquel on peut joindre le cobalt, si elles étaient isolées, soient *identiques* au point de vue magnétique, car la tendance à l'égalité d'effets, qui existe à la température ordinaire, ne subsiste plus à une température plus élevée.

On sait en effet que ces corps perdent presque toutes leurs propriétés magnétiques à une température critique différente pour chacun d'eux : le nickel vers 400 degrés, le fer vers 600 degrés, et le cobalt à une température encore plus haute. L'étude de ces phénomènes, et particulièrement de ceux que présentent les limailles, fera l'objet d'un travail spécial. Dans le présent Mémoire, nous n'avons étudié que des substances prises en masses métalliques continues.

2° *Cobalt.* — Les échantillons de cobalt que nous avons pu étudier nous ont donné des résultats analogues à ceux du nickel.

Le barreau de cobalt donné par M. Menier a été comparé au fer de Suède ; il a présenté un maximum assez voisin de l'unité, comme le nickel de même provenance.

Le cobalt a atteint ce maximum plus rapidement qu'un barreau d'acier de même longueur et de même poids com-

paré au même barreau de fer de Suède, ainsi que le montre le Tableau suivant, qui correspond à des intensités magnétiques graduellement croissantes :

Cobalt.	Acier.
»	0,725
0,791	»
0,811	0,735
0,825	0,742
0,911	0,760
0,886	0,753
»	0,852

Le cobalt en fil donné par M. H. Sainte-Claire Deville a été comparé au même fil de fer que le fil de nickel et nous a donné, comme rapport, un nombre beaucoup plus grand : 0,5, au lieu de 0,2 qu'avait donné le nickel.

Il semble résulter de cette dernière série d'expériences que le cobalt prend à saturation plus de magnétisme que le nickel, mais cette conclusion demanderait à être contrôlée par d'autres déterminations.

Nous terminerons ces considérations en faisant remarquer que, malgré les grandes différences que présentent entre elles les propriétés magnétiques du fer, du nickel, du cobalt et de leurs composés, ces corps sont cependant considérablement plus magnétiques et plus voisins les uns des autres, à ce point de vue, que la plupart des corps de la nature.

CONCLUSIONS.

On peut déduire des présentes recherches les conclusions suivantes :

1° Le rapport des effets magnétiques temporaires développés à la température ordinaire par des influences magnétiques croissantes, dans un barreau d'un des échantillons de nickel ou de cobalt étudiés plus haut, et dans un barreau de fer doux de même longueur, de même poids ou

de même section, est un nombre variable avec l'intensité magnétique à laquelle ces métaux sont soumis. Ce rapport, pour de très-faibles intensités, commence par décroître, passe par un minimum, puis augmente, atteint un maximum, et, pour des intensités toujours croissantes, décroît jusqu'à une limite inférieure. Les variations dans le rapport considéré correspondent à des variations d'intensité d'autant plus faibles que la section des barreaux soumis à l'expérience est plus petite par rapport à leur longueur.

2° Le rapport de l'intensité du magnétisme temporaire développé dans les barreaux de nickel, de cobalt et de fer à l'intensité de l'influence magnétisante est également un nombre variable avec cette intensité. Ce rapport présente un maximum qui correspond à des intensités plus faibles pour le fer doux que pour le nickel et le cobalt étudiés précédemment; il décroît ensuite indéfiniment.

3° La saturation magnétique, dans les mêmes échantillons de nickel et de cobalt, a lieu pour des intensités plus faibles que dans le fer doux.

Nos expériences et les considérations qui précèdent permettent de conclure que les fontes et les aciers se saturent aussi plus vite que le fer doux ([1]).

4° L'existence d'une force coercitive a pour effet de diminuer les actions magnétiques temporaires; un recuit prolongé rapproche l'une de l'autre les propriétés magnétiques des divers échantillons déjà cités et celles du fer doux.

5° Des échantillons de nickel, très-peu denses, probablement poreux et ne présentant pas de force coercitive appréciable, ont donné lieu à des effets magnétiques très-voisins de ceux du fer doux.

([1]) M. Wiedemann (*Lehre vom Galvanismus und Elektromagnetismus*, Bd. II, p. 359; 1874) a posé la conclusion inverse pour le fer et l'acier; il est facile de voir que cette déduction provenait d'une étude limitée à une variation du rapport des effets magnétiques comprise entre le minimum et le maximum.

6° Pour des intensités infiniment faibles, dans des conditions très-éloignées de la saturation ou avec des substances dans lesquelles les particules magnétiques sont assez éloignées pour ne pas réagir les unes sur les autres, les effets développés dans des molécules de nickel et de fer à la température ordinaire paraissent très-voisins les uns des autres.

On ne s'est occupé, dans ce Mémoire, que de l'aimantation temporaire développée par influence ; l'aimantation permanente qui peut subsister dans les divers barreaux fera l'objet d'une étude spéciale.

INSTRUCTIONS SUR LA MANIÈRE DE PRODUIRE LES INTERFÉRENCES A GRANDES DIFFÉRENCES DE MARCHE (1);

PAR M. LÉON FOUCAULT.

Extrait du *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault* (2).

R est un faisceau de lumière parallèle pénétrant dans la chambre obscure (*fig.* 1).

L est une lentille cylindrique de $0^m,01$ de foyer; son axe est placé verticalement.

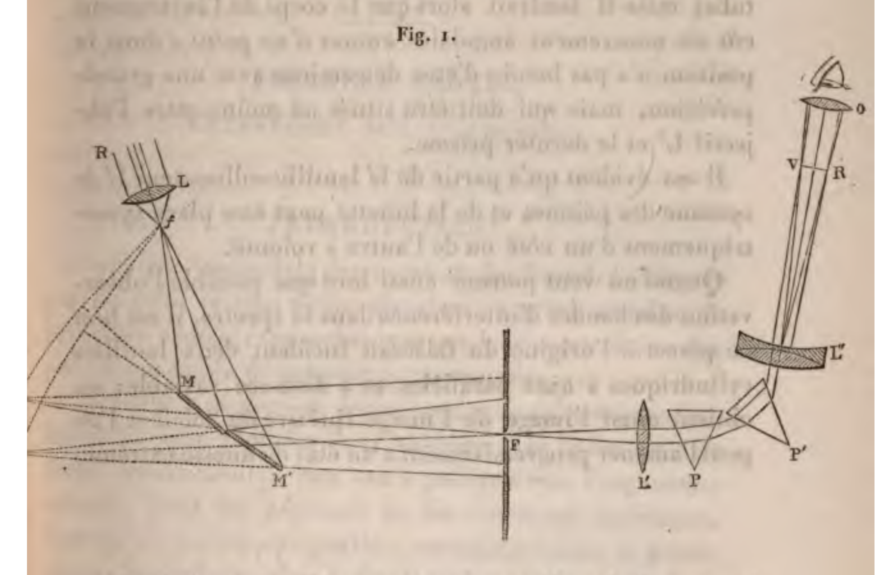
A 1 mètre du foyer *f* sont les miroirs de Fresnel M et M'; c'est le miroir M' qui, pendant l'expérience, doit prendre

(1) Note inédite.

(2) *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, publié par Mme Ve Foucault, sa mère, mis en ordre par M. Gariel, ingénieur des Ponts et Chaussées, Professeur agrégé de Physique à la Faculté de Médecine de Paris et précédé d'une Notice sur les OEuvres de L. Foucault, par M. J. Bertrand, Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences. Un beau volume in-4, avec un atlas de même format contenant 19 planches gravées sur cuivre ; 1878.

l'avance sur l'autre. Quelle que soit cette avance du miroir M′ sur le miroir M, il faut toujours que ceux-ci fassent entre eux un angle tel que les faisceaux réfléchis empiètent légèrement l'un sur l'autre comme dans la figure.

Fig. 1.



A $1^m,50$ environ des miroirs et au milieu de l'espace où les faisceaux réfléchis se pénètrent, on place une fente verticale F dont la largeur doit être très-petite par rapport à celles des franges visibles ou invisibles sur ses bords.

Le mince pinceau qui traverse cette fente va tomber en divergeant, à $1^m,50$ de distance, sur une lentille sphérique L′ non achromatique, jouant le rôle de collimateur et ayant en conséquence $1^m,50$ de foyer.

De là, le faisceau rendu parallèle traverse successivement un ou plusieurs prismes P, P′, etc., puis va tomber à la surface d'une lentille achromatique L″, de $0^m,50$ de foyer, et qui a pour effet de réunir en un spectre focal VR le faisceau dispersé. Enfin l'on observe ce spectre dans l'espace au moyen d'un oculaire O monté sur un support

que l'on promène à la main pour examiner les bandes d'interférence dans les différentes couleurs. La lentille L″ et l'oculaire O jouent ici le rôle d'une véritable lunette, et rien ne s'oppose à ce qu'on les monte à demeure sur un tube; mais il faudrait alors que le corps de l'instrument eût un mouvement angulaire autour d'un point *c* dont la position n'a pas besoin d'être déterminée avec une grande précision, mais qui doit être située au moins entre l'objectif L″ et le dernier prisme.

Il est évident qu'à partir de la lentille collimateur L′ le système des prismes et de la lunette peut être placé symétriquement d'un côté ou de l'autre à volonté.

Quand on veut pousser aussi loin que possible l'observation des bandes d'interférence dans le spectre, il est bon de placer à l'origine du faisceau incident deux lentilles cylindriques à axes parallèles et à distance variable; on obtient ainsi l'image de l'image linéaire du Soleil et l'on peut l'amener progressivement à un état de finesse extrême.

MÉMOIRE SUR LES MATIÈRES ALBUMINOÏDES;

PAR M. PAUL SCHUTZENBERGER.

PREMIÈRE PARTIE.

RECHERCHES SUR L'ALBUMINE.

INTRODUCTION.

L'analyse immédiate des tissus et des liquides élaborés par les êtres vivants a fait connaître un grand nombre de principes azotés, rapprochés tant par leur composition que par un ensemble de propriétés communes.

Ces corps, auxquels on donne le nom de *substances albuminoïdes* pour rappeler leur analogie avec l'albumine de l'œuf, constituent à eux seuls presque tout l'organisme animal; dans les végétaux on les rencontre également, bien qu'en moindre proportion, notamment dans le protoplasma des cellules, c'est-à-dire là où l'évolution biologique est le plus active.

Personne ne songe à mettre en doute l'importance du rôle qu'ils sont appelés à jouer dans l'ensemble du mécanisme chimique de la vie, et l'étude des matières albuminoïdes constitue certainement la base fondamentale de la Chimie biologique.

En effet, comment pourrait-on chercher à suivre les transformations multiples et complexes de la matière, pendant les diverses phases de l'évolution, du développement et de la destruction des éléments histologiques, tant que la constitution chimique et les réactions possibles des principes constitutifs de ces éléments ne sont pas parfaitement connues?

La nécessité d'éclaircir cette question a été si bien com-

prise et se présentait dès le début avec tant d'évidence, que les savants les plus éminents ont, à diverses époques, dirigé leurs efforts dans cette voie.

Les recherches entreprises en vue d'éclaircir l'histoire chimique des matières albuminoïdes peuvent se partager en deux groupes. Les unes ont particulièrement pour but de distinguer et de caractériser chacun des corps de cette famille. On a été ainsi amené à reconnaître l'existence d'un nombre assez considérable de substances quaternaires azotées. Suivant des analogies plus ou moins prochaines, on a subdivisé les composés albuminoïdes en plusieurs genres. Nous n'insisterons pas sur la classification descriptive des divers principes azotés extraits de l'organisme vivant, puisque les recherches personnelles qui font l'objet de ce Mémoire n'ont pas eu pour but de fournir de nouveaux éléments à cette étude et d'augmenter le catalogue déjà si étendu des matières albuminoïdes.

Dans d'autres travaux, les savants se sont plus spécialement attachés à déterminer la constitution chimique de ces corps par l'étude des transformations qu'ils sont susceptibles d'éprouver sous l'influence des agents physiques ou chimiques. C'est à cet ordre d'idées que se rattachent les expériences que j'ai faites.

Le poids moléculaire d'un corps tel que l'albumine est certainement très-élevé. Si l'on tient compte de sa capacité de combinaison avec les bases et de la nécessité de faire figurer dans sa molécule au moins 1 atome de soufre, on arrive à une expression minima du genre de celle qui a été proposée par Lieberkühn :

$$C^{72}H^{112}Az^{18}O^{22}S.$$

Mais rien ne prouve que cette formule ne doive pas être multipliée par 2, 3, ...

Une semblable complication ne permet pas de tenter *a priori* une hypothèse sérieuse sur la nature et la consti-

tution de ces corps. Ce n'est qu'en démolissant un édifice aussi élevé, en le réduisant en matériaux plus simples et de nature connue, que l'on peut espérer trouver le fil conducteur.

De nombreuses tentatives ont été faites dans cette voie. On a essayé successivement l'action des agents oxydants, tels que l'acide azotique, l'acide chromique, les mélanges d'acide sulfurique étendu et de bichromate de potasse ou de bioxyde de manganèse, l'hypermanganate de potasse, le brome en présence de l'eau, des agents d'hydratation et de dédoublement, tels que les acides sulfurique et chlorhydrique plus ou moins étendus, les hydrates d'oxydes alcalins et alcalinoterreux, les ferments organisés et les ferments solubles, etc.

D'utiles renseignements ont été fournis par ces diverses méthodes d'investigation. Néanmoins, il n'a pas été possible de formuler, d'après les résultats obtenus, une idée tant soit peu nette sur la constitution des matières albuminoïdes. Cet insuccès tient, d'une part, à ce que les dérivés obtenus sont dans beaucoup de cas des produits d'une décomposition trop profonde pour qu'il soit permis, d'après eux, de se prononcer sur la nature du composé initial, d'autre part et surtout à ce que la plupart des expériences ont fourni, à cause des conditions dans lesquelles elles ont été faites, à côté de 15 à 20 pour 100 de principes définis et cristallisables, 80 à 85 pour 100 de substances sirupeuses, incristallisables, dont la nature restait aussi inconnue que celle de la substance albuminoïde initiale.

Ainsi, au lieu de pouvoir écrire :

$$X \text{ (inconnue, matière albuminoïde)} = A + B + C + \ldots;$$

A, B, C étant des quantités connues, on est arrivé généralement à une équation indéterminée :

$$X = A + B + C + \ldots + Y \text{ (inconnue)},$$

dans laquelle Y représente la grosse part de X.

C'est cette lacune importante de l'histoire chimique des matières azotées de l'organisme vivant que j'ai cherché à combler.

Choisir une réaction de décomposition nette et facile à interpréter, étudier cette réaction d'une façon complète et méthodique, construire, au moyen des seuls résultats de l'expérience et sans le secours d'aucune hypothèse, une équation de décomposition ayant pour premier membre la matière albuminoïde et pour second membre *tous* les termes de la réaction, tel est le but que je me suis proposé et que je crois avoir atteint d'une façon satisfaisante, après trois ans d'efforts soutenus.

Une semblable équation, résumant en quelques lignes des centaines de déterminations et d'analyses, et basée *uniquement* sur l'expérience, ne peut être comparée aux équations hypothétiques proposées par divers auteurs pour représenter la constitution des matières albuminoïdes. Ainsi, Hunt a considéré ces corps comme des amides des substances hydrocarbonées, bien que ce rapprochement ne soit justifié par aucun fait établi et ne repose que sur des combinaisons de formules écrites sur le papier.

MM. Béchamp, Millon et Commaille se sont rapprochés davantage de la vérité, tout en restant bien loin de la réalité des choses, en considérant l'albumine et ses analogues comme des corps imidés.

L'équation très-compliquée que propose M. Béchamp renferme en second membre tous les produits cristallisables dont l'analyse immédiate a révélé la présence dans l'organisme vivant et dont l'origine est attribuée, à tort ou à raison, aux matières protéiques ou albuminoïdes; beaucoup d'entre eux n'ont jamais pu être obtenus artificiellement aux dépens de l'albumine ou de ses analogues. De plus, rien ne prouve qu'en s'hydratant l'albumine produise simultanément tous ces corps et dans des proportions adoptées uniquement en vue d'arriver à l'accord parfait

entre les deux membres de l'équation. L'hypothèse et l'imagination ont donc, dans l'équation de M. Béchamp, une part *bien plus large* que l'expérience et l'interprétation des faits, et c'est à tort que ce savant réclame la priorité des résultats qui font l'objet de ce Mémoire, résultats qui n'ont absolument rien de commun avec ceux de ses travaux, comme pourra facilement s'en assurer tout lecteur impartial.

Dans le courant de ce Mémoire, j'aurai soin de rappeler plus particulièrement les points de contact de mes recherches avec celles de mes devanciers.

CHAPITRE PREMIER.

MÉTHODE EXPÉRIMENTALE.

Ayant observé que les matières albuminoïdes soumises à l'action d'une solution d'hydrate de baryte, dans des conditions convenables, se transforment intégralement en principes cristallisables ou définis, il m'a semblé que l'étude complète et approfondie de cette réaction devait conduire à la solution du problème de la constitution des matières protéiques ou albuminoïdes, ou tout au moins avancer la question.

Des recherches poursuivies dans ce sens pendant trois années me permettent de présenter aujourd'hui un travail assez avancé pour justifier pleinement ces prévisions.

Plusieurs années se sont écoulées depuis mes premières publications sur ce sujet. Ce temps a été en grande partie consacré à des travaux de contrôle et de vérification. Les conclusions générales énoncées précédemment sont sorties intactes de cette épreuve, et ce n'est que sur quelques points de détail que j'aurai à introduire des modifications et des développements nouveaux.

C'est avec une pleine confiance dans leur exactitude que

je présente aujourd'hui au public savant le résultat *définitif* de mes travaux sur un sujet aussi complexe.

Pour éviter toute réclamation de priorité, je dois dire que l'action de l'hydrate de baryte sur les matières albuminoïdes a déjà fait l'objet d'un travail antérieur au mien.

Nasse a cherché à déterminer la dose d'ammoniaque mise en liberté pendant l'ébullition d'un poids connu de matière protéique avec une solution d'hydrate de baryte.

Ce savant s'est borné à l'examen de ce point particulier de la réaction ; encore les conditions dans lesquelles il s'est placé ne lui ont-elles pas permis de l'éclaircir entièrement.

Je crois pouvoir revendiquer dans cette étude :

1° Les conditions spéciales de l'opération dirigée en vue d'obtenir une action complète et ultime ;

2° La méthode suivie dans l'étude de la réaction, dans le but d'accumuler le plus grand nombre possible de données qualitatives et quantitatives.

Jusqu'à présent, mes recherches les plus étendues ont porté sur l'albumine d'œuf coagulée par la chaleur ; cependant, un assez grand nombre d'expériences ont été faites avec d'autres principes azotés de l'organisme vivant, et l'on peut, dès à présent, en tirer d'importantes conclusions sur les différences de constitution des diverses matières albuminoïdes.

Cette seconde partie de mon travail est encore en voie d'exécution et ne pourra être présentée complète qu'un peu plus tard.

La méthode expérimentale consiste à chauffer, dans un vase hermétiquement clos, un mélange de matière albuminoïde et d'une solution concentrée d'hydrate de baryte.

Les proportions relatives de substance organique et d'hydrate de baryte, la température à laquelle ce mélange

est porté, ainsi que la durée de l'expérience, sont variées entre certaines limites. L'influence de ces modifications sur le mode de décomposition est déterminée par l'examen des produits formés.

Pour éviter l'action assez énergique qu'exerce l'hydrate de baryte sur le verre lorsqu'on dépasse 100 degrés, et même déjà à cette température si l'on prolonge le contact, j'ai fait constamment usage d'un vase en acier fondu.

L'appareil se compose (*fig.* 1) d'un cylindre creux foré

Fig. 1.



dans un bloc d'acier fondu, à parois internes bien dressées et polies. L'épaisseur du vase est suffisante pour lui permettre de résister à des pressions bien supérieures à celles auxquelles il est soumis. Le cylindre est fermé par un bouchon en acier fortement appliqué par l'intermédiaire d'un étrier en fer forgé et d'une vis de pression. Le joint est rendu hermétique au moyen d'une rondelle en plomb placée entre le cylindre et le bouchon. Le métal comprimé pénètre dans une série de fines gouttières circulaires et concentriques creusées dans la section annulaire supérieure de la paroi du cylindre. On évite ainsi les moindres fuites, et le niveau du liquide ne varie pas, même après huit jours d'expérience, à 200 degrés.

Quelles que soient les conditions de proportion, de tem-

pérature et de durée de chauffe, le traitement du contenu du vase s'exécute de la même manière.

Celui-ci n'est ouvert qu'après complet refroidissement. Généralement on constate l'absence de pression et de gaz insolubles dans l'eau ; quelquefois, si la température a été portée à près de 200 degrés et si l'on a employé une forte proportion de baryte, il sort un peu d'hydrogène du cylindre au moment où l'on desserre la vis. Cet hydrogène, qui n'est mélangé d'aucune trace de carbure, provient, comme je m'en suis assuré, d'une action secondaire du fer sur l'hydrate de baryte.

Le contenu répand une odeur ammoniacale prononcée, accompagnée d'une odeur désagréable rappelant celle des matières fécales; il se compose d'un liquide ou solution aqueuse jaune ambré et d'un dépôt solide formé d'un mélange de cristaux d'hydrate barytique et d'un précipité grenu, grisâtre, constitué par des sels barytiques insolubles.

Le tout est versé dans une grande fiole à fond plat. On lave bien l'intérieur du vase à l'eau froide, de manière à réunir dans la fiole la totalité de la baryte et du dépôt insoluble, et à ne rien laisser dans le vase métallique. Au moyen d'une tige cylindrique en bois, munie d'une brosse en fils de fer, on arrive facilement à détacher les parties du dépôt adhérentes aux parois lisses du cylindre en acier.

La fiole, qui doit être d'une capacité double du volume du liquide qu'elle reçoit, est mise en communication avec un réfrigérant de Liebig descendant. Celui-ci (*fig.* 2) est relié à deux flacons de 1 litre de capacité, à gros goulot, munis de bouchons en liége percés de deux trous et fonctionnant comme des flacons de Woolf. Le premier, celui qui est en relation avec le réfrigérant, est vide ; le second, relié au premier par un tube adducteur plongeant jusqu'au fond, renferme une solution moyennement concentrée d'a-

cide chlorhydrique. La fiole est chauffée sur un bain de sable. On distille assez de liquide pour expulser toute l'ammoniaque et tous les produits volatils en même temps qu'une certaine quantité d'eau.

L'opération étant terminée, on mélange la solution chlorhydrique du deuxième flacon avec l'eau ammoniacale distillée et condensée dans le premier; le tout est étendu à

Fig. 2.



1 litre et conservé pour le dosage de l'ammoniaque. L'acide chlorhydrique employé doit être plus que suffisant pour saturer l'ammoniaque.

Le liquide barytique resté dans la fiole, complétement privé d'ammoniaque et de produits volatils, ne répand plus qu'une odeur peu marquée. On le verse encore chaud sur un filtre taré, à l'abri de l'acide carbonique de l'air. La partie insoluble, restée sur le filtre, est lavée à l'eau bouillante, séchée et pesée.

Elle se présente sous forme d'une poudre grenue, cristalline, de couleur gris clair, quelquefois jaunâtre, par suite de la présence de quantités variables d'oxyde de fer formé par l'attaque des parois du cylindre.

Des expériences directes ont montré que vers 200 degrés

l'hydrate de baryte en solution concentrée agit sur le fer et donne lieu à la formation d'oxydule de fer et d'hydrogène.

Le liquide filtré est complétement précipité par un courant prolongé d'acide carbonique, jusqu'à refus d'absorption. Il reste toujours une certaine quantité de baryte non éliminable par l'acide carbonique, et cette quantité varie suivant que la précipitation a lieu dans le liquide froid ou maintenu à l'ébullition ; dans le second cas, elle est notablement plus élevée.

Il convient donc, pour avoir des résultats constants, d'opérer toujours la précipitation par l'acide carbonique dans les mêmes conditions, soit à froid, soit à l'ébullition.

On filtre et on lave à l'eau jusqu'à épuisement. Le liquide filtré et les eaux de lavage sont concentrés et la baryte restée en solution est *exactement* précipitée par l'acide sulfurique ; on filtre et on lave le sulfate de baryte, qui est séché et pesé. Ce poids donne en équivalent de bases la quantité d'acides forts contenue dans le mélange. La constance du résultat fourni dans diverses expériences faites avec une même substance albuminoïde permet d'utiliser cette donnée dans la discussion générale.

Le liquide séparé par filtration du sulfate de baryte a une réaction franchement acide ; l'analyse qualitative y démontre la présence d'acide acétique accompagné de traces d'acide formique ; il convient donc de doser l'acide acétique, dont la proportion s'est également révélée constante.

A cet effet, une fois la précipitation de la baryte non éliminable par l'acide carbonique effectuée, au moyen d'une quantité strictement équivalente d'acide sulfurique, on distille le liquide dans le vide jusqu'à siccité complète, en condensant et recueillant toute l'eau qui distille.

Afin d'éviter d'avoir à distiller une trop grande quantité de liquide aqueux, il convient d'évaporer dans une capsule à l'air libre, avant la précipitation de la baryte par l'acide sulfurique, jusqu'au volume de 1 litre environ pour 100 grammes de matière albuminoïde.

Tant que la solution est neutre, l'évaporation à l'air s'effectue sans coloration sensible; mais, une fois la baryte précipitée, le vide et une basse température (40 à 50 degrés) sont nécessaires si l'on veut éviter de voir prendre à la solution une teinte de plus en plus foncée.

L'appareil dont je me suis servi dans toutes mes expériences se compose d'un ballon de 1,5 à 2 litres de capacité, à parois assez épaisses pour résister à la pression de l'atmosphère lorsque le vide y est effectué. Ce ballon, fixé dans un bain-marie, est fermé par un bon bouchon en caoutchouc percé de deux trous. Dans l'un s'engage le tube courbé à angle aigu d'un réfrigérant de Liebig placé dans sa position descendante de distillation. Le second trou porte un tube en verre courbé en siphon, dont l'une des branches pénètre jusqu'au centre du ballon et dont l'autre, la plus longue, est partagée en deux morceaux reliés par un tube en caoutchouc muni d'une bonne pince de pression. L'extrémité inférieure et externe de ce siphon plonge dans le liquide à évaporer. Le siphon est destiné à l'alimentation.

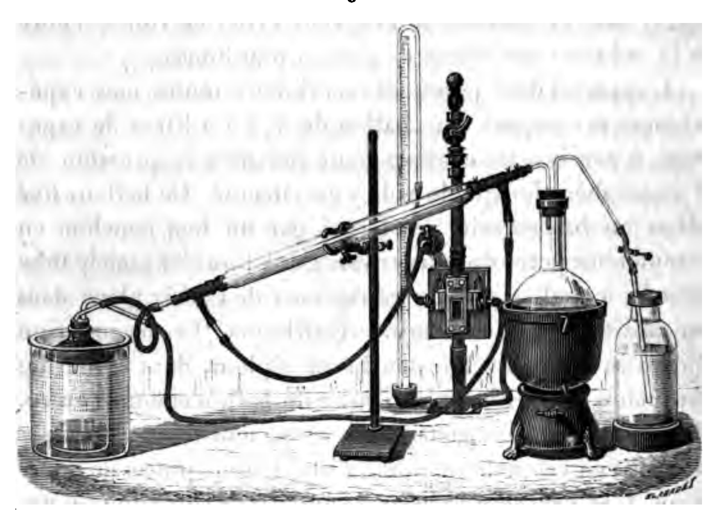
Le vide étant fait dans le ballon, il suffit de desserrer légèrement la pince de pression du caoutchouc pour laisser rentrer une quantité convenable du liquide à distiller. C'est aussi par ce tube qu'on peut laisser pénétrer l'air à la fin de l'expérience.

L'extrémité du tube réfrigérant opposée à celle qui est engagée dans le ballon communique, par un caoutchouc à vide de 25 à 30 centimètres de long, avec un tube recourbé, adapté par sa seconde branche à un bouchon en caoutchouc, fixé à un récipient en verre fort plongé dans l'eau

froide. Ce récipient communique, d'autre part, avec une trompe à eau d'Alvergniat, faisant le vide à moins de 1 centimètre près (*fig.* 3).

Le tout étant en place et le ballon contenant $\frac{1}{2}$ litre environ de liquide, on laisse fonctionner la trompe jusqu'à un vide de 750 millimètres, ce qui n'exige que quelques mi-


Fig. 3.



nutes ; puis on ferme la communication de l'appareil avec la trompe.

La distillation continue à se faire régulièrement si l'on alimente de temps en temps et si l'on complète le vide de quart d'heure en quart d'heure, pour compenser les très-légères pertes que peuvent offrir les joints.

Certaines liqueurs moussent avec une telle facilité, qu'il est presque impossible de les distiller ainsi sans voir la mousse entraînée dans le récipient, à moins de n'introduire dans le ballon que 20 à 25 centimètres cubes de liquide et d'alimenter goutte à goutte, d'une manière continue, en

desserrant très-légèrement la pince à vis du tube en caoutchouc.

Cet inconvénient s'observe toutes les fois que l'action de la baryte n'a pas été poussée assez loin et qu'il reste des colloïdes dans la liqueur. Dans les expériences complètes, lorsque tout est converti en cristalloïdes, il n'y a pas de mousse et l'expérience est facile à diriger.

Le liquide aqueux distillé est recueilli pour le dosage alcalimétrique de l'acide acétique; il ne renferme que de l'eau et de l'acide acétique mélangé de *traces* d'acide formique.

Le résidu solide, resté dans le ballon, est maintenu dans le vide et chauffé à 100 degrés au bain-marie jusqu'à ce qu'il ne passe plus la moindre trace d'eau à l'extrémité du réfrigérant. On arrive ainsi à une dessiccation complète, que l'on peut rendre absolue, dans le vide à 100 degrés, en remplaçant le premier flacon condensateur par un autre contenant de l'acide sulfurique concentré, et en déterminant une légère aspiration d'air sec au moyen de la trompe et du tube à siphon, dont on ouvre la pince quelque peu.

Le résidu ainsi obtenu est jaune clair, friable, et se détache très-facilement des parois du ballon. Il contient tous les principes fixes formés aux dépens de la matière organique et il les renferme dans les proportions dans lesquelles ils ont pris naissance. Nous donnerons à ce résidu le nom de *résidu fixe*.

Si l'on a eu soin de peser le ballon vide, en en prenant le poids avec le résidu fixe on aura par différence le poids de ce résidu. L'importance de cette détermination n'échappera à personne; aussi ne saurait-on apporter trop de soins à la rendre aussi exacte que possible. J'ai reconnu que, malgré des lavages prolongés à l'eau bouillante, le précipité de carbonate de baryte formé par l'acide carbonique pouvait retenir énergiquement quelques grammes de matière or-

ganique. Il est nécessaire de le délayer dans l'eau bouillante, de le décomposer par une quantité strictement convenable d'acide sulfurique, de filtrer et de laver le sulfate de baryte, enfin d'évaporer à sec, dans le vide, le liquide filtré et les eaux de lavage, afin de pouvoir ajouter le poids du résidu à celui du résidu fixe obtenu précédemment. En négligeant cette précaution, on peut commettre une erreur de 5 à 8 pour 100 dans cette détermination.

Le résidu fixe détaché des parois du ballon est broyé, afin d'obtenir un mélange homogène, puis soumis à l'analyse élémentaire et à l'analyse immédiate. Ce broyage préalable est nécessaire, car, pendant la concentration, certains principes peu solubles, tels que la leucine et la tyrosine, se séparent en cristallisant et peuvent se trouver inégalement répartis dans la masse des eaux mères desséchées.

En résumé, la matière protéique soumise à l'expérience se trouve ainsi décomposée de la manière suivante :

1° Solution chlorhydrique d'ammoniaque contenant des traces de produits volatils, dont il sera question dans un paragraphe spécial;

2° Sels barytiques insolubles dans l'eau, formés pendant la réaction de la baryte aqueuse sur la matière albuminoïde;

3° Acide acétique;

4° Résidu fixe ou mélange de tous les principes solides fixes au-dessus de 100 degrés, formés aux dépens de la substance albuminoïde.

Nous allons, dans les Chapitres suivants, appliquer cette méthode générale aux diverses matières albuminoïdes, et la suivre dans tous les développements qu'elle est susceptible de recevoir et dans les conséquences qu'elle permet de déduire de l'ensemble des données expérimentales.

CHAPITRE II.

APPLICATION DE LA MÉTHODE GÉNÉRALE A L'ÉTUDE DE LA CONSTITUTION DE L'ALBUMINE D'ŒUF.

J'ai choisi tout d'abord, pour appliquer la méthode sommairement décrite plus haut, une matière albuminoïde facile à obtenir en grandes quantités dans un état de pureté satisfaisant.

L'albumine d'œuf, coagulée par la chaleur, en présence d'un très-léger excès d'acide acétique, remplit ces conditions. On trouve dans le commerce, pour les besoins de l'industrie, du blanc d'œuf desséché qu'il suffit de dissoudre dans l'eau et de coaguler à 100 degrés, après légère acidulation. Le coagulum bien lavé à l'eau et à l'éther, puis séché à 140 degrés, offre une composition très-sensiblement constante et fournit, comme on le verra plus loin, des résultats toujours semblables entre eux. On sait, il est vrai, qu'il existe dans le blanc d'œuf plusieurs corps coagulables par la chaleur, se distinguant par le pouvoir rotatoire et par la température à laquelle la coagulation se produit (Béchamp, A. Gautier); mais on n'a jusqu'à présent pu déceler la moindre différence de composition; on peut donc se demander si la distinction subsiste dans les produits coagulés rendus insolubles par la chaleur. Dans tous les cas, il ne peut être question que de divergences très-légères, de second ou de troisième ordre, et dont nous n'avons pas à tenir compte dans un premier travail, destiné surtout à déblayer le terrain et à établir la valeur de la méthode. La question pourra être reprise à ce point de vue plus délicat lorsque la précision des moyens d'investigation permettra de le tenter avec quelque chance de succès.

A moins d'indications spéciales, il est convenu, lorsqu'il sera question d'albumine coagulée, que les expériences ont

porté sur le blanc d'œuf dissous, légèrement acidulé à l'acide acétique, coagulé à l'ébullition, bien lavé à l'eau, exprimé à la presse, dégraissé à l'éther et séché à 140 degrés.

§ I. — *Observations sur la composition élémentaire de l'albumine d'œuf coagulée par la chaleur.*

La composition élémentaire de l'albumine employée aux expériences joue un rôle si important dans l'interprétation des résultats, que j'ai cru ne pas devoir m'en tenir aux nombres publiés antérieurement. Du moment, en effet, où je renonçais à opérer sur un principe défini par des caractères physiques et chimiques absolument constants, rien ne prouvait l'invariabilité de composition, et il devenait nécessaire de déterminer directement celle de la substance employée. Je dirai même que l'obligation m'en fut imposée par un désaccord insurmontable entre les données de mes expériences et la composition moyenne de l'albumine résultant de l'ensemble des analyses publiées. En comparant la somme des produits de décomposition au poids d'albumine employée, j'arrivai constamment à une perte sensible de carbone (3 à 4 pour 100 environ), bien que les dosages n'aient porté que sur des corps faciles à séparer, tels qu'acides carbonique, oxalique et acétique, et résidu fixe. En réalité, cette perte n'était qu'apparente; j'ai trouvé que la teneur en carbone et en hydrogène de l'albumine employée dans mes expériences, était sensiblement celle admise généralement pour ce corps (carbone, 52,8; hydrogène, 7,1); mais l'azote déterminé par la méthode directe de M. Dumas, avec un produit bien dégraissé à l'éther et employé sous forme de poudre impalpable passée au tamis de soie, a été trouvé de quelques dixièmes plus fort qu'on ne l'a donné jusqu'à présent (16,3 à 16,6 pour 100, au lieu de 15,8). Des expériences comparatives m'ont démontré l'absolue nécessité de réduire l'albumine sèche en poudre

palpable, si l'on veut avoir des dosages d'azote exacts. tte précaution a, du reste, déjà été indiquée par plusieurs périmentateurs. Quoi qu'il en soit, que la divergence tre mes dosages et ceux publiés antérieurement tienne à te cause ou à une différence réelle dans la composition mentaire des produits analysés, cette correction m'a rmis d'exprimer l'ensemble de mes résultats par une uation rigoureuse.

Voici les nombres trouvés pour l'albumine employée :

Albumine séchée à 140 degrés et dégraissée à l'éther.

(a_1)	Matière	0,4205
	Acide carbonique	0,790
	Eau	0,263
(a_2)	Matière	0,776
	Volume d'azote mesuré	101cc,5
	H	761mm
	T	4°
	Volume calculé	99cc,3
(a_3)	Matière	1,242
	Cendres	0,038
(a_4)	Matière	1,0425
	Volume d'azote mesuré	139cc,5
	H	756mm
	T	6°
	Volume calculé	134cc,5
(b_1)	Matière	0,650
	Volume mesuré d'azote	88cc,5
	H	756mm,5
	T	7°
	Volume calculé	85cc,0
(b_2)	Matière	1,000
	Cendres	0,0194

(c_1)	Matière	0,6245
	Volume d'azote mesuré	$82^{cc},5$
	H	767^{mm}
	T	8°
	Volume calculé	$80^{cc},0$
(c_2)	Matière	1,271
	Cendres	0,009

Ces nombres calculés en centièmes donnent, après correction des cendres :

	a_1.	a_2.	a_3.	a_4.	b_1.	b_2.	c_1.	c_2.
Carbone	52,80	»	»	»	»	»	»	»
Hydrogène	7,16	»	»	»	»	»	»	»
Azote	»	16,56	»	16,7	16,7	»	16,2	»
Oxygène	»	»	»	»	»	»	»	»
Cendres	»	»	3,0	»	»	1,94	»	0,7

Thiry avait déjà trouvé, en 1863 (*Physiol. Zeitschrift*), que la teneur en azote de l'albumine s'élève à 16,5 pour 100.

§ II. — *Classification des produits du dédoublement.*

L'expérience, conduite comme nous l'avons dit à propos de la méthode générale, fournit comme éléments de discussion :

1° Des produits volatils condensés dans l'acide chlorhydrique;

2° Un dépôt insoluble, *en grande partie* formé de sels barytiques;

3° Un liquide distillé acide, contenant des acides volatils;

4° Un résidu fixe, composé de tous les principes immédiats solides qui résultent du dédoublement de l'albumine, résidu dont on détermine la composition élémentaire, la capacité de saturation et la composition immédiate.

Occupons-nous successivement des résultats obtenus,

avec l'albumine, à ces divers points de vue. Les produits volatils séparés par la première distillation du contenu du cylindre et entraînés avec la vapeur d'eau sont de l'ammoniaque qui s'unit à l'acide chlorhydrique, et une *petite quantité* d'une huile volatile venant nager sous forme de quelques gouttes huileuses à la surface du liquide aqueux condensé dans le premier flacon.

§ III. — *Détermination de l'ammoniaque mise en liberté.*

Les expériences ont généralement porté sur 100 grammes d'albumine coagulée sèche. Cette dose convenait le mieux à la capacité du cylindre qui jaugeait 750 centimètres cubes.

Nasse [1] avait déjà déterminé la dose d'ammoniaque fournie par diverses matières albuminoïdes bouillies avec de l'hydrate de baryte et de l'eau. Dans ces conditions, elles cèdent toutes une fraction de leur azote sous forme d'ammoniaque. Cette fraction varie avec la nature de la substance; elle est toujours assez petite, excepté pour le gluten. Mes expériences confirment en ce point celles du physiologiste cité.

Voici ce que l'on observe à cet égard avec l'albumine, dans diverses conditions de température et avec diverses proportions de baryte.

Sous l'influence de l'ébullition, à la pression ordinaire, avec 3 parties de baryte pour 1 partie d'albumine, le dégagement d'azote ammoniacal est très-notable au début et atteint environ 1,3 pour 100 dans la première demi-heure. Cette limite, une fois atteinte, peut être dépassée par une ébullition prolongée, mais lentement et progressivement. Ainsi, au bout de cent vingt heures, on isole environ 2 pour 100 d'azote ammoniacal, puis, à partir de cette se-

[1] O. Nasse, *Studien über Eiweisskörper* (*Arch. f. d. ges. Physiol.*, t. VI, p. 589).

conde limite, on ne constate plus de mise en liberté sensible d'ammoniaque. En recueillant l'ammoniaque dans une solution normale d'acide sulfurique, j'ai trouvé les doses suivantes d'azote ammoniacal pour 100 grammes d'albumine coagulée sèche :

		gr
Après une demi-heure		1,2
»	2^h	1,3
»	48	1,4
»	72	1,54
»	96	1,8
»	120	2,2

Dans le cylindre à 120 degrés avec 3 parties de baryte, on atteint la seconde limite de 2,2 d'azote ammoniacal pour 100 d'albumine, en six à huit heures ; à 150 degrés, avec 2 parties de baryte pendant douze heures, on isole 3,1 pour 100 d'azote ammoniacal. Si, au contraire, on chauffe entre 150 et 180 degrés, avec 3 parties de baryte pendant douze à vingt-quatre heures, on obtient de 3,95 à 4,1 pour 100 d'azote ammoniacal, et cette limite ne peut plus être sensiblement dépassée, même en portant la dose de baryte à 6 parties pour 1 d'albumine et en chauffant jusque vers 200 degrés pendant six à huit jours.

J'ai porté la température jusqu'à 260 degrés pendant plusieurs heures, avec 5 à 6 parties de baryte, sans augmenter notablement la quantité d'azote ammoniacal. On a trouvé, dans ce cas, 4,4 au lieu de 4,0-4,1.

Je puis conclure d'un grand nombre d'expériences concordantes que, suivant les conditions, il existe quatre maxima pour l'azote ammoniacal.

Le premier correspond à une réaction très-rapide s'opérant dans les premiers moments de l'ébullition avec la baryte ; sa valeur est de 1,0 à 1,3 pour 100.

Le deuxième correspond en partie à la première réaction rapide et en partie à une réaction s'opérant très-lentement

(cent vingt heures) à 100 degrés et, en quelques heures, à 120 degrés avec 3 parties de baryte; sa valeur est de 2,2 pour 100, dont la moitié se rapporte à la réaction rapide.

Le troisième, dont la valeur est 3,1 pour 100, correspond à 150 degrés avec 2 parties de baryte.

Le quatrième correspond pour les trois quarts aux trois premiers phénomènes et pour l'autre quart à la réaction déterminée par un excès de baryte au-dessus de 150 degrés. Ces trois limites indiquent nettement trois dédoublements successifs opérés dans des conditions de plus en plus intenses.

§ IV. — *Sels barytiques insolubles.*

La décomposition de l'albumine sous l'influence de la baryte est généralement accompagnée de la formation d'un dépôt insoluble, en grande partie constitué de sels barytiques. La quantité de dépôt ainsi isolée varie, comme l'ammoniaque, avec la température et la dose de baryte employée, et se trouve, jusqu'à un certain point, en relation avec la quantité d'azote ammoniacal.

Voici les renseignements que je puis fournir sur sa composition et son poids dans diverses conditions.

Dans la première demi-heure d'ébullition, vers 100 degrés, il ne se précipite presque rien de la solution d'albumine dans la baryte. L'azote ammoniacal (1,0-1,1 pour 100) qui se sépare, ne correspond donc pas à la production simultanée d'un acide formant un sel barytique insoluble. Si, au contraire, on se place dans les conditions où l'azote ammoniacal limite est égal à 2,2 pour 100, on trouve un dépôt insoluble pesant 14 grammes pour 100 d'albumine. Ces 14 grammes sont un mélange de 4 grammes d'une matière organique azotée, insoluble dans l'acide chlorhydrique et dont nous parlerons plus loin, de 4gr,7 de carbonate de baryte, de 4gr,5 d'oxalate de baryte et enfin de 0gr,8 environ de phosphate alcalinoterreux, d'oxyde de fer provenant de l'albumine et de sulfate de baryte.

A 150 degrés, avec 2 parties de baryte, pendant douze heures, on a trouvé un dépôt pesant $19^{gr},1$ et contenant :

Carbonate de baryte.	$10^{gr},1$
Oxalate de baryte....................	5,0
Phosphate alcalinoterreux, oxyde de fer, sulfite de baryte et matière organique..	4,0

Avec 3 parties de baryte, à 150-180 degrés, pendant deux à huit jours, le poids du dépôt s'élève à 24 grammes environ; il renferme :

Carbonate de baryte..................	10,5
Oxalate de baryte....................	9,0
Matière organique, phosphate, sulfite, oxyde de fer.....................	4,5

Avec un excès de baryte, 5 à 6 parties, à 180 degrés, pendant quarante-huit heures et plus, le poids du carbonate de baryte reste le même, 10,5 pour 100, mais la dose d'oxalate de baryte atteint une valeur double, 17,5 à 18 pour 100; le dépôt insoluble pèse alors de 31 à 32 grammes, avec 4 à 4,5 de matière organique, phosphate, sulfite et sulfate et oxyde de fer.

Enfin, vers 250 degrés, avec 5 à 6 parties de baryte, pendant cinq à six heures, on a trouvé la même dose à peu près de carbonate de baryte et 24 grammes d'oxalate.

Si nous comparons ces divers résultats aux doses d'azote ammoniacal correspondantes, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

1° Les doses limites extrêmes d'ammoniaque et d'acides carbonique et oxalique sont entre elles dans les rapports de 2 molécules d'ammoniaque pour chaque molécule d'acide carbonique ou oxalique;

2° Le premier tiers de l'azote ammoniacal se dégage facilement à 100 degrés, sans séparation sensible d'acides carbonique et oxalique;

3° Le deuxième tiers correspond surtout à l'acide

carbonique, et le troisième à une fraction de l'acide oxalique.

Il est à remarquer que la séparation totale de l'azote ammoniacal s'obtient bien avant celle de l'acide oxalique. Ainsi, à 160 degrés, avec 3 parties de baryte, on trouve 4,08 d'azote ammoniacal et seulement 8,07-9,0 d'oxalate de baryte, tandis que la limite extrême de ce dernier sel est 24 pour 100.

On explique tous ces résultats en admettant que la molécule d'albumine renferme un groupement oxamide et un autre carbamide. L'oxamide se scinderait d'abord, en perdant la moitié de son azote et en laissant un groupement oxamique, puis la carbamide se décomposerait en acide carbonique et ammoniaque, en même temps qu'une petite fraction du groupement oxamique; la température étant plus élevée, celui-ci se transformerait, à son tour, en ammoniaque et acide oxalique dont une partie se séparerait de suite et dont une autre resterait unie ou copulée aux composés du résidu fixe. Ce n'est que sous l'influence d'une action plus énergique que la majeure partie et le reste de l'acide oxalique apparaissent en liberté.

Nous trouverons plus loin des faits qui viennent appuyer cette manière de voir, et nous reviendrons alors sur ce point important.

Le tableau ci-joint résume les résultats en ce qui concerne l'azote ammoniacal, le carbonate et l'oxalate de baryte.

Conditions de l'expérience.	Azote ammoniacal.	Carbonate de baryte.	Oxalate de baryte.
Ébullition à pression ordinaire, une demi-heure à 1 heure, 3 parties de baryte	1,1 -1,3	traces	traces
120 degrés, 2 à 3 parties de baryte, 12 heures...........	2,2 -2,3	4,7	4,5
150 degrés, 2 parties de baryte, 12 heures...............	3,1	9,10	5,0

Conditions de l'expérience.	Azote ammoniacal.	Carbonate de baryte.	Oxalate de baryte.
150-180 degrés, 3 parties de baryte, 48-100 heures........	3,95-4,1	10,5	8,7 9,0
180 degrés, 4 à 6 parties de baryte, 48-100 heures........	4,1	10,5	17,5-18
250 degrés, 5 à 6 parties de baryte, 6 à 8 heures..........	4,4	12,0	24

A l'appui des conclusions précédentes, nous donnons les résultats expérimentaux suivants. Dans les expériences faites à l'ébullition, le ballon contenant le mélange communiquait avec un réfrigérant de Liebig ascendant, relié à deux flacons de Woolf, dont le premier était vide et le second contenait un volume connu de solution sulfurique titrée, à travers laquelle barbotaient les gaz. La perte de titre donnait l'ammoniaque. Dans les expériences faites dans l'autoclave, la solution chlorhydrique d'ammoniaque servait au dosage de ce corps; on en prélevait un volume correspondant à 10 grammes d'albumine, que l'on évaporait en présence d'un excès de chlorure de platine, pour peser le chloroplatinate d'ammoniaque; ou bien on distillait le liquide avec un excès de baryte et l'on recueillait l'ammoniaque dans de l'acide sulfurique normal.

Dans le premier cas, il est nécessaire de chauffer pendant quelque temps le liquide acide au bain-marie, avant d'ajouter le chlorure de platine, pour expulser l'huile volatile qu'il renferme et qui réduirait un peu de chlorure de platine.

Dans le dépôt de sels barytiques insolubles, on a dosé l'acide carbonique par le procédé ordinaire, c'est-à-dire en décomposant un poids connu du dépôt par l'acide chlorhydrique dans l'appareil usité, et en pesant la perte due au dégagement d'acide carbonique. On peut aussi, après dissolution du dépôt dans l'acide chlorhydrique additionné d'un peu d'acide nitrique, ébullition et filtration du li-

quide, précipiter par l'ammoniaque pure en excès pour séparer l'oxalate de baryte, les phosphates et l'oxyde de fer, et ensuite par le carbonate d'ammoniaque. Les résultats fournis par la seconde méthode concordent généralement avec ceux de la première, à moins que l'albumine n'ait pas été dégraissée. En effet, dans ce cas, le poids du carbonate de baryte est un peu trop fort de 0,5 à 1 pour 100.

Pour déterminer l'oxalate de baryte, il ne suffit pas de peser le précipité fourni par l'ammoniaque, puisqu'il renferme des phosphates et de l'oxyde de fer.

Ce précipité est bouilli avec une solution de carbonate de soude; on filtre et, après avoir décomposé le carbonate de soude par un léger excès d'acide acétique et bouilli la liqueur pour expulser l'acide carbonique, on précipite par le chlorure de calcium. Le poids d'oxalate de chaux trouvé est converti par le calcul en oxalate de baryte.

Ceci posé, nous nous contenterons de donner les résultats calculés pour 100 d'albumine, sans entrer dans les détails numériques des analyses. Les déterminations d'oxalate et de carbonate de baryte ont toutes porté sur des quantités effectives égales à 100 ou 50 grammes d'albumine.

Expérience n° 1. — Albumine, 100 grammes; baryte cristallisée, 200 grammes; eau, 250 grammes; 100 degrés, douze heures.

Azote ammoniacal	2,1
Carbonate de baryte	3,6
Oxalate »	3,4

Expérience n° 2. — Albumine, 100 grammes; baryte cristallisée, 200 grammes; eau, 250 grammes; 115-120 degrés, douze heures.

Azote ammoniacal	2,3
Carbonate de baryte	4,7
Oxalate »	4,3

Expérience n° 3. — Albumine, 100 grammes; baryte cristallisée, 200 grammes; eau, 250 grammes; 140-150 degrés, douze heures.

Azote ammoniacal...............	3,1
Carbonate de baryte.............	10,5
Oxalate »	5,0

Expérience n° 4. — Albumine, 100 grammes; baryte cristallisée, 300 grammes; eau, 250 grammes; 175-180 degrés, quarante-huit heures.

Azote ammoniacal...............	3,95-4,03
Carbonate de baryte....	10,8
Oxalate »	8,0

Expérience n° 5. — Albumine coagulée dégraissée, 50 grammes; baryte cristallisée, 200 grammes; eau, 250 grammes; 150 degrés, quarante-huit heures.

Azote ammoniacal...........	4,06
Carbonate de baryte.......	10,4-11,0
Oxalate »	8,3

Expérience n° 6. — Albumine, 100 grammes; baryte cristallisée, 300 grammes; eau, 250 grammes; 200 degrés, cent vingt heures.

Azote ammoniacal....	3,95
Carbonate de baryte............	11,0
Oxalate »	8,6

Expérience n° 7. — Albumine, 100 grammes; baryte cristallisée, 150 grammes; eau, 250 grammes; 175 degrés, soixante-douze heures.

Azote ammoniacal...............	4,06

Expérience n° 8. — Albumine, 50 grammes; baryte cristallisée, 300 grammes; eau, 250 grammes; 180 degrés, quarante-huit heures.

Azote ammoniacal...............	3,99
Carbonate de baryte..............	11,2
Oxalate »	18,2

Expérience n° 9. — Albumine, 100 grammes; baryte cristallisée, 500 grammes; eau, 300 grammes; 175 degrés, douze heures, puis 260 degrés, deux heures.

Azote ammoniacal...............	4,36
Carbonate de baryte............	?
Oxalate »	17,5

Expérience n° 10. — Albumine, 100 grammes; baryte cristallisée, 500 grammes; eau, 400 grammes; 180 degrés, quarante-huit heures.

Azote ammoniacal...............	4,09
Carbonate de baryte............	10,09
Oxalate »	16,0

Expérience n° 11. — Albumine, 100 grammes; baryte cristallisée, 500 grammes; eau, 400 grammes; 175 degrés, quarante-huit heures.

Azote ammoniacal...............	4,03
Carbonate de baryte............	10,7
Oxalate »	17,6

Expérience n° 12. — Albumine, 100 grammes; baryte cristallisée, 200 grammes; eau, 250 grammes; 160 degrés, vingt-huit heures.

Azote ammoniacal...............	4,1
Carbonate de baryte............	10,8
Oxalate »	8,6

Expérience n° 13. — Albumine dégraissée, 100 grammes; baryte cristallisée, 500 grammes; eau, 400 grammes; 175-180 degrés, cent vingt heures.

Azote ammoniacal...............	4,02
Carbonate de baryte............	10,9
Oxalate »	17,3

Expérience n° 14. — Albumine dégraissée, 100 grammes; baryte, 600 grammes; eau, 400 grammes; cylindre en argent [1], 250 degrés, six heures.

Azote ammoniacal	4,41
Carbonate de baryte	12,5
Oxalate »	24,2

Expérience n° 15. — Albumine dégraissée, 100 grammes; baryte, 600 grammes; eau, 400 grammes; cylindre en argent, douze heures à 200 degrés.

Azote ammoniacal	4,1
Carbonate de baryte	10,8
Oxalate »	17,4

§ V. — *Détermination de la dose d'acide acétique mis en liberté après précipitation de la baryte employée par l'acide carbonique et l'acide sulfurique.*

L'acide acétique a été titré alcalimétriquement au moyen d'une solution de soude normale à un équivalent ($31^{gr} Na^2O$) par litre, dans le liquide obtenu par la distillation dans le vide; il est accompagné d'une *faible* dose d'acide formique.

La proportion d'acide acétique est toujours relativement faible; elle varie avec la température et la proportion de baryte.

Nos des expériences du § IV.	Acide acétique pour 100.
3	2,7
4	3,48
6	3,78
12	3,66
9	4,20
11	4,92
13	4,65
14	5,4

---

(1) Le cylindre en acier recevait un cylindre mince en argent pur d'un diamètre un peu plus petit, afin d'éviter toute action secondaire.

§ VI. — *Poids du résidu fixe.*

La détermination du poids du résidu fixe offre une grande importance; il doit, en effet, servir de base à l'équation de la réaction. Il a été mesuré avec grand soin dans l'expérience type n° 3, faite avec de l'albumine coagulée, soigneusement dégraissée à l'éther et séchée à 140 degrés, puis chauffée à 150 degrés avec 3 parties de baryte. Plusieurs essais avaient donné des nombres variant entre 86, 5 et 90 pour 100. Ces nombres se trouvant en désaccord avec d'autres données et conduisant à une perte inexplicable de substance de 6 à 8 pour 100, j'ai été amené à rechercher si le carbonate de baryte formé en précipitant la liqueur par l'acide carbonique ne renfermait pas de matière organique. Ce précipité, bien lavé à l'eau bouillante et séché, développe, en effet, par la calcination, une odeur manifeste de matière azotée brûlée et prend une teinte grise. Le précipité, encore humide, a été décomposé par un léger excès d'acide sulfurique étendu et bouillant. Le liquide filtré et les eaux de lavage ont été exactement débarrassés de l'acide sulfurique excédant par une addition convenable d'eau de baryte, filtrés et distillés dans le vide. Il est resté un résidu acide dont le poids complétait ce qui manquait dans les premières expériences. Le carbonate de baryte formé par précipitation à froid au moyen d'un courant d'acide carbonique du liquide initial entraîne donc une portion de la matière organique que l'on ne peut enlever même par des lavages à l'eau chaude.

Dans cette expérience n° 3, la première évaporation du liquide séparé du carbonate de baryte a fourni un résidu pesant 89,3 pour 100 d'albumine; l'évaporation du liquide obtenu, en décomposant le carbonate de baryte par l'acide sulfurique, a laissé un résidu pesant $6^{gr},53$. Poids total du résidu fixe, 95,83.

Dans l'expérience n° 11, § IV, l'évaporation du liquide séparé du carbonate de baryte après précipitation par l'acide sulfurique de la baryte non précipitée par l'acide carbonique a fourni un résidu pesant 90,85; celle du liquide provenant du lavage du sulfate de baryte a laissé un résidu pesant 5,65. Poids total du résidu fixe, 96,5.

On peut admettre, d'après cela, que 100 grammes d'albumine fournissent de 96 à 97 grammes de résidu fixe, après avoir perdu 4gr,8 d'ammoniaque, 3gr,5 à 4gr,5 d'acide acétique, 2gr,3 d'acide carbonique et 3gr,3 ou 6gr,6 d'acide oxalique, c'est-à-dire un minimum de matière égal à 14 grammes ou un maximum de 18gr,2. Cette différence nous montre que, dans l'action la plus modérée de la baryte sur l'albumine, il y a fixation d'eau compensant en partie les produits volatils ou précipitables par la baryte, et qui ne comptent pas dans le résidu fixe. La réaction est donc un dédoublement par hydratation.

§ VII. — *Analyse élémentaire du résidu fixe.*

Le résidu fixe qui reste après évaporation à sec dans le vide du liquide débarrassé de baryte par l'acide carbonique et l'acide sulfurique, sous forme d'une masse friable jaune clair, un peu hygrométrique, est uniquement organique. S'il a été préparé avec soin, de manière à bien enlever la totalité de la baryte, sans excès d'acide sulfurique, il laisse tout au plus quelques dixièmes pour 100 de cendres siliceuses. On peut, du reste, doser ces cendres et en tenir compte. Bien que ce résidu soit un mélange assez complexe de divers principes, comme nous le verrons plus loin, j'ai cru utile de le soumettre à l'analyse élémentaire, de traduire cette analyse par une formule figurative, afin de pouvoir écrire une équation dont le premier membre renferme l'albumine coagulée et l'eau fixée, tandis que le second contient l'ammoniaque, l'acide carbonique, l'acide

oxalique, l'acide acétique et le *résidu fixe* envisagé provisoirement comme un principe unique. Cette manière de procéder nous permettra de tirer d'importantes conséquences.

Les analyses élémentaires ont été faites avec des produits séchés à 100 ou 140 degrés. A 140 degrés, la matière séchée à 100 degrés perd une quantité sensible d'eau qui influe sur les résultats de l'analyse. Cette perte pouvant être due à une déshydratation de certains principes contenus dans le résidu fixe, j'ai cru devoir établir deux systèmes d'équations dont l'un se rapporte au produit séché à 100 degrés seulement et l'autre au produit séché à 140 degrés. Les conditions de l'expérience influent aussi, dans une certaine mesure, sur la composition du résidu fixe, et doivent être mentionnées. Afin de donner aux résultats le plus de certitude possible, les analyses ont porté sur un poids de matière assez élevé, $0^{gr},8$ à 1 gramme. Les dosages d'azote ont été faits, pour la plupart, par la méthode des volumes de M. Dumas; enfin on a corrigé les résultats en tenant compte des cendres.

Les analyses qui ont porté sur des produits provenant d'opérations distinctes seront marquées de lettres différentes; les analyses diverses d'un même produit seront marquées d'une même lettre affectée d'indices numériques.

A. Analyses de résidus fixes obtenus dans des conditions moyennes : albumine, 100 grammes; baryte cristallisée, 200 à 300 grammes; eau, 200 grammes; température, 140 à 180 degrés; durée de chauffe, quarante-huit à cent heures. Dans ces conditions, on a trouvé :

	Pour 100.
Azote sous forme d'ammoniaque.	4,0
Carbonate de baryte...........	10,5
Oxalate de baryte.............	8,5
Acide acétique................	3,6

(a_1)	Matière séchée à 100 degrés	1,153
	Acide carbonique	2,030
	Eau	0,795
(a_2)	Matière séchée à 100 degrés	0,435
	Acide carbonique	0,7655
	Eau	0,3125
(a_3)	Matière séchée à 100 degrés	0,9635
	Volume d'azote mesuré	100^{cc}
	H.	$756^{mm},5$
	T.	11°
	Volume corrigé	$94^{cc},4$
(a_4)	Cendres pour 100 de matière	0,91

Ce qui donne en centièmes, après correction :

	a_1.	a_2.	a_3.	a_4.
Carbone	48,4	48,4	»	»
Hydrogène	7,72	8,0	»	»
Azote	»	»	12,4	»
Oxygène	»	31,6	»	»
Cendres	»	»	»	0,91

(b_1)	Matière séchée à 100 degrés	0,684
	Acide carbonique	1,2175
	Eau	0,495
(b_2)	Matière séchée à 100 degrés	0,4185
	Acide carbonique	0,7445
	Eau	0,302
(b_3)	Matière séchée à 100 degrés	0,711
	Volume d'azote mesuré	74^{cc}
	H	760^{mm}
	T.	10°
	Volume corrigé	$70^{cc},5$
(b_4)	Cendres pour 100 de matière	0,1

	b_1.	b_2.	b_3.
Carbone	48,54	48,52	»
Hydrogène	8,04	8,01	»
Azote	»	»	12,45
Oxygène	30,97	»	»

(c_1)	Matière séchée à 100 degrés	0,569
	Acide carbonique	0,997
	Eau	0,4145
(c_2)	Matière séchée à 100 degrés	0,8745
	Volume d'azote mesuré	94^{cc}
	H	750^{mm}
	T	11°
	Volume corrigé	$87^{cc},9$
(c_3)	Cendres pour 100 de matière	0,21

En centièmes, après correction des cendres, on a :

	c_1.	c_2.
Carbone	47,87	»
Hydrogène	8,09	»
Azote	»	12,60
Oxygène	31,51	»

(d_1)	Matière séchée à 140 degrés	0,492
	Acide carbonique	0,894
	Eau	0,342
(d_2)	Matière séchée à 140 degrés	0,761
	Volume d'azote mesuré	$80^{cc},5$
	H	760^{mm}
	T	12°
	Volume corrigé	76^{cc}

En centièmes, on a :

	d_1.	d_2.
Carbone	49,5	»
Hydrogène	7,72	»
Azote	»	12,5
Oxygène	30,28	»

B. Analyses de résidus fixes obtenus avec 5 à 6 partie de baryte pour 1 partie d'albumine, chauffés vers 200 degré pendant quarante-huit heures.

(e_1)	Matière séchée à 100 degrés.....	0,665
	Acide carbonique..............	1,163
	Eau..........................	0,486
(e_2)	Matière séchée à 100 degrés......	0,735
	Volume d'azote mesuré.........	81cc,5
	H.........................	759mm
	T..........................	16°
	Volume corrigé................	75cc,5
(e_3)	Matière séchée à 100 degrés......	0,665
	Volume d'azote mesuré.........	74cc
	H.........................	758mm,5
	T..........................	16°
	Volume corrigé..............	68cc,5
(e_4)	Cendres pour 100 de matière....	1,0

En centièmes, on a :

	e_1.	e_2.	e_3.
Carbone........	48,16	»	»
Hydrogène......	8,20	»	»
Azote..........	»	13,03	12,93
Oxygène........	30,75	»	»

(f_1)	Matière séchée à 100 degrés.....	0,524
	Acide carbonique........... ...	0,920
	Eau.........................	0,3855
(f_2)	Matière séchée à 100 degrés. ...	0,751
	Volume d'azote mesuré.........	85cc
	H.........................	752mm
	T..........................	16°
	Volume corrigé..............	78cc,0
(f_3)	Cendres pour 100 de matière....	1,3

dant un temps limité, l'apparence du résidu fixe est bien différente que dans les autres. Il est incristallisable, colloïde, et la liqueur mousse beaucoup pendant l'évaporation dans le vide.

§ VIII. — *Examen de l'huile essentielle volatile.*

Il nous reste à examiner l'huile essentielle volatile qui accompagne d'une manière constante la décomposition de l'albumine par la baryte. La proportion de cette huile n'a pu être déterminée exactement ; dans tous les cas, elle est fort minime. L'huile volatile n'apparaît, en effet, pendant la distillation du contenu de l'autoclave, que sous forme de quelques gouttes nageant à la surface de l'eau ammoniacale contenue dans le premier flacon condensateur. Elles se dissolvent dans l'acide chlorhydrique lorsqu'on mélange les liquides des deux récipients. La quantité n'en dépasse certainement pas 1 à 2 pour 100.

Ce liquide contient du pyrrol, ou tout au moins un corps très-voisin du pyrrol ; toutes les réactions s'accordent à le prouver. Il donne, avec le perchlorure de fer, une coloration vert foncé, puis un dépôt noir ; avec l'acide chlorhydrique étendu et le bichromate de potasse, il fournit un précipité noir ; l'acide chlorhydrique étendu le dissout, et la solution abandonnée à elle-même dépose, au bout de quelque temps, des flocons rouge brun. L'analyse élémentaire de ce dépôt a fourni des nombres assez rapprochés de ceux du rouge pyrrolique. La solution chlorhydrique de l'huile essentielle réduit le bichlorure de platine.

Analyse des flocons rouge brun formés spontanément dans la solution chlorhydrique :

(a_1)	Matière	0,271
	Acide carbonique	0,713
	Eau	0,1835

(a_2) Matière	0,327
Volume d'azote mesuré	33cc
H	758mm
T	10°
Volume corrigé	31cc,3

En centièmes, on a :

	a_1.	a_2.	Théorie pour le rouge pyrrolique.
Carbone	71,75	»	71,2
Hydrogène	7,5	»	6,93
Azote	»	12,02	13,0
Oxygène	8,88	»	8,87

L'accord n'est pas aussi complet qu'on pourrait le désirer, mais on sait que le rouge pyrrolique lui-même n'a pas une composition constante. L'excès de carbone et d'hydrogène et le poids trop faible d'azote permettent de supposer la présence d'homologues supérieurs du rouge de pyrrol ordinaire.

Une opération faite sur une grande échelle et portant sur 10 kilogrammes d'albumine m'a permis de recueillir 50 à 60 grammes de cette huile volatile et de l'examiner de plus près. Même après l'élimination de toute trace d'ammoniaque ou d'alcali volatil par l'agitation avec un léger excès d'acide sulfurique étendu, elle conserve une odeur *sui generis* qui, à faible dose, rappelle celle des truffes. Elle représente un mélange de plusieurs corps à points d'ébullition distincts. Vu les petites quantités disponibles, il m'a été impossible d'en séparer, par distillation fractionnée, les produits constitutifs à l'état de pureté. J'ai néanmoins cherché à tirer parti de l'échantillon dont je disposais pour arriver à une notion approchée sur sa nature. Son odeur spéciale m'ayant fait penser qu'il pourrait contenir un corps sulfuré, j'ai dosé le soufre aussi bien dans le précipité rouge que dans l'huile essentielle, que j'appellerai *albuminol*.

(b_1)	Matière rouge solide	0,235
	Sulfate de baryte obtenu	0,055
(c_1)	Albuminol	0,372
	Sulfate de baryte	0,059
(c_2)	Albuminol	0,276
	Sulfate de baryte	0,054

En centièmes, on a :

	b_1.	c_1.	c_2.
Soufre	3,1	2,1	2,6

On peut conclure de là que l'albuminol renferme un principe sulfuré mélangé à de fortes proportions de corps exempts de soufre. L'albuminol a été partagé en quatre portions par distillation fractionnée :

La première, passant entre 113 et 120 degrés ;

La seconde, passant entre 120 et 140 degrés ;

La troisième, passant entre 140 et 180 degrés ;

La quatrième, formée des produits bouillant au-dessus de 180 degrés.

Les quatre liquides ainsi obtenus ne pouvant plus être utilement soumis à de nouveaux fractionnements, on a analysé chacun d'eux.

(d) Liquide passant de 113 à 120 degrés :

(d_1)	Matière	0,2165
	Acide carbonique	0,532
	Eau	0,162
(d_2)	Matière	0,223
	Volume d'azote mesuré	8^{cc},5
	H	765^{mm}
	T	14°
	Volume corrigé	8^{cc},01
(d_3)	Matière	0,372
(Anal. c_1)	Sulfate de baryte	0,059

En centièmes, on a :

	d_1.	d_2.	d_3.
Carbone	67,01	»	»
Hydrogène	8,31	»	»
Azote	»	4,51	»
Oxygène	18,07	»	»
Soufre	»	»	2,1

(e) Liquide passé entre 120 et 140 degrés :

(e_1)	Matière	0,388
	Acide carbonique	0,967
	Eau	0,286
(e_2)	Matière	0,360
	Volume d'azote mesuré	12^{cc}
	H	772^{mm}
	T	$12°$
	Volume calculé	$11^{cc},5$
(e_3)	Matière	0,287
	Sulfate de baryte	0,061

En centièmes, on a :

	e_1.	e_2.	e_3.
Carbone	67,96	»	»
Hydrogène	8,18	»	»
Azote	»	4,01	»
Soufre	»	»	2,8
Oxygène	17,0	»	»

(f) Liquide passé entre 140 et 180 degrés :

(f_1)	Matière	0,228
	Acide carbonique	0,606
	Eau	0,208
(f_2)	Matière	0,2135
	Volume d'azote mesuré	18^{cc}
	H	765^{mm}
	T	$13°$
	Volume corrigé	$17^{cc},0$

(f_3) Matière	0,276
(Anal. e_2) Sulfate de baryte	0,054

En centièmes, on a :

	f_1.	f_2.	f_3.
Carbone	72,05	»	»
Hydrogène	10,12	»	»
Azote	»	10,0	»
Soufre	»	»	2,6
Oxygène	4,50	»	»

(g) Liquide bouillant au-dessus de 180 degrés.

(g_1)	Matière	0,384
	Acide carbonique	1,086
	Eau	0,372
(g_2)	Matière	0,246
	Volume d'azote mesuré	$17^{cc},2$
	H	768^{mm}
	T	11°
	Volume corrigé	$16^{cc},48$

En centièmes, on a :

	g_1.	g_2.
Carbone	77,13	»
Hydrogène	10,76	»
Azote	»	8,40
Soufre et oxygène	3,71	»

Bien que ces diverses analyses ne se rapportent pas à des produits définis, nous pouvons en tirer quelques conclusions intéressantes.

Les deux premières portions contiennent de 18 à 17 pour 100 d'oxygène et 4,5 à 4,1 d'azote, tandis que, dans les dernières, l'oxygène n'est plus que 4,5 à 3,7 au maximum; encore ce dernier nombre comprend-il le soufre. Je ne pense pas faire une hypothèse trop hasardeuse en admettant que l'albuminol est un mélange de deux espèces

de produits : l'un, le plus volatil, étant oxygéné et non azoté ; l'autre serait, au contraire, azoté et non oxygéné. Comme, d'un autre côté, la présence du pyrrol est établie par tous ses caractères et que ce liquide bout à 133 degrés, on peut admettre que l'azote (4,5 à 4,1 pour 100) trouvé dans les parties qui passent de 113 à 140 degrés appartient à du pyrrol mélangé à une substance volatile oxygénée et non azotée. Nous négligerons le soufre, dont la dose est peu élevée.

En cherchant à traduire les deux premières analyses par une formule contenant au moins un atome d'azote, on arrive à une expression très-voisine de la suivante :

$$C^{16}H^{23}AzO^{3},$$

qui exige :

Carbone	69,3
Hydrogène	8,3
Azote	5,0
Oxygène	17,4

En retranchant de cette formule l'azote sous forme de pyrrol C^4H^5Az, il reste $C^{12}H^{18}O^3$ ou $3C^4H^6O$.

Ainsi, bien que nous n'ayons pu isoler le composé oxygéné à l'état de pureté, on peut cependant admettre que les éléments s'y trouvent unis dans des rapports très-voisins de ceux de la formule C^4H^6O. Quant aux fonctions de ce corps, à sa constitution et à la place qu'il occupe dans la classification des composés organiques, il est impossible de se prononcer. J'ai constaté qu'il ne s'unit pas au bisulfite de soude.

Les portions bouillant entre 140 et 180 degrés offrent une composition assez rapprochée de celle d'un homologue supérieur du pyrrol, tels que le méthyl et l'éthylpyrrol. Ces portions fournissent du reste très-rapidement du rouge pyrrolique par l'action combinée de l'air et de l'acide chlorhydrique étendu.

En résumé, nous pouvons considérer comme démontré que l'albuminol est un mélange de divers produits liquides, volatils, parmi lesquels se trouve un corps dont la composition est représentée par une formule très-voisine de C^4H^6O, du pyrrol, des homologues supérieurs du pyrrol, ainsi qu'une faible proportion de composé sulfuré. Il m'a été impossible de saisir la moindre trace d'indol, dont la présence a été signalée dans ces derniers temps par M. Nencky parmi les produits du dédoublement de l'albumine sous l'influence du suc pancréatique.

La quantité d'albuminol fournie par l'albumine est si faible, que l'on ne peut lui assigner un rôle sérieux dans la constitution de ce corps et dans la réaction. Nous négligerons ce produit dans la discussion et l'équation générale au moyen de laquelle nous résumerons les résultats acquis.

§ IX. — *Examen analytique du résidu fixe.*

Jusqu'à présent nous avons traité le résidu fixe comme s'il constituait une espèce chimique, un principe immédiat, en vue d'établir sa relation de composition avec l'albumine; il nous reste à étudier sa composition immédiate. La nature du principe qu'il renferme ne permet pas d'utiliser d'autres méthodes de séparation que celle des cristallisations fractionnées, en se fondant sur les différences de solubilité dans les dissolvants neutres, tels que l'eau, l'alcool à divers degrés de concentration, l'éther, etc.

Bien que quelques-uns de ces produits soient volatils dans des conditions convenables, l'altérabilité des autres sous l'influence de la chaleur rend impossible l'emploi de cet agent dans la séparation régulière et méthodique. Les précipitations par des sels métalliques ne donnent pas non plus de bons résultats. Les acétates neutre ou basique de plomb fournissent des précipités peu abondants, faci-

lement solubles dans un excès de réactif. Avec le nitrate mercurique on obtient des dépôts plus volumineux, mais les corps isolés de ces précipités par l'hydrogène sulfuré sont rarement exempts d'acide azotique et cristallisent difficilement; de plus, la liqueur filtrée devient impropre à toute recherche ultérieure, l'acide azotique ne pouvant plus en être éliminé. Bref, après avoir perdu beaucoup de temps en essais infructueux et multipliés dans cette voie, j'y ai définitivement renoncé et me suis exclusivement attaché à la méthode des dissolvants neutres et des cristallisations.

Les divers dépôts cristallins que l'on obtient peuvent se distinguer, dans une certaine mesure, par des caractères de solubilité, par la forme et l'apparence des cristaux, surtout au microscope. Mais, comme nous le verrons plus loin, les corps constituant le mélange appartiennent à un petit nombre de groupes dont chacun renferme des termes homologues. Pour les termes voisins d'un même groupe, les oppositions de propriétés sont souvent très-peu marquées. De plus, deux termes d'un même groupe ou de deux groupes voisins ont généralement des tendances à cristalliser ensemble dans les rapports de leurs poids moléculaires. On obtient ainsi, très-fréquemment, des produits intermédiaires, ce qui augmente les difficultés du diagnostic.

La mesure des points de fusion si féconde dans l'examen de certains mélanges de principes organiques immédiats, tels que les acides gras, est ici de nul secours. La plupart des corps trouvés fondent en se décomposant ou se volatilisent sans fondre.

De ces considérations résulte que, sans dédaigner les renseignements que peuvent fournir l'examen physique et l'emploi de certains réactifs, j'ai dû prendre comme base principale l'*analyse élémentaire* des termes isolés. Cette voie longue, pénible et fastidieuse, constituant le

seul moyen pratique et sûr d'investigation, je n'ai pas cru devoir reculer devant la nécessité de brûler indistinctement tous les dépôts cristallisés obtenus.

Les conclusions auxquelles je suis arrivé reposent sur plus de cinq cents analyses élémentaires, portant tantôt sur des principes immédiats que j'avais lieu de considérer comme purs, tantôt sur des mélanges.

Je me garderai d'encombrer ce Mémoire de la publication de tous les nombres ainsi accumulés; beaucoup n'ont servi qu'à me guider dans mes recherches, surtout au début, lorsque j'opérais encore en pleines ténèbres. Je me contenterai de grouper méthodiquement un certain nombre de ces analyses, en vue d'appuyer et de prouver ce que j'avance.

Mes recherches les plus variées ont porté sur les résidus fixes obtenus avec 3 à 6 parties de baryte, à des températures comprises entre 150 et 200 degrés. Les analyses élémentaires démontrent que ces variations de conditions n'influent pas beaucoup sur la composition de ce résidu. L'hydratation y est terminée ou à peu de chose près, et les différences ne portent que sur la dose d'acide oxalique éliminé.

Comme composition moyenne, nous pouvons admettre les nombres suivants :

		Théorie.
Carbone	48,4	48,35
Hydrogène	8,0	8,0
Azote	12,5	12,52
Oxygène	31,0	

qui conduisent à la formule $C^{27}H^{54}Az^{6}O^{13}$ ou à un multiple de cette formule, que nous n'employons que comme un moyen commode de résumer les résultats, puisqu'il s'agit d'un mélange. On voit que l'expression précédente est à très-peu de chose près de la forme $C^{n}H^{2n}Az^{2}O^{4}$ et n'en diffère que par un léger excès d'oxygène. Le rapport

atomique de l'azote à l'oxygène fourni par les analyses est égal à 1 : 2, 17.

Les deux termes les plus faciles à isoler du résidu fixe et à caractériser, en raison de leur faible solubilité, sont la *tyrosine* et la *leucine*, signalées depuis longtemps parmi les produits de l'hydratation de l'albumine et de ses congénères.

Pour arriver à les retirer et à les purifier facilement, il est avantageux de concentrer le liquide aqueux primitif, après la précipitation de l'excès de baryte par un courant d'acide carbonique, sans éliminer par l'acide sulfurique la baryte qui reste en solution. Il arrive un moment où le liquide se couvre, pendant l'évaporation, d'une pellicule cristalline. Abandonné au refroidissement, il donne en très-peu de temps une abondante cristallisation A, en grains formés par l'agglomération de cristaux plus petits autour d'un centre. Le poids de ce dépôt A, égoutté à la trompe, fortement exprimé à la presse et séché, s'élève à 25 ou 30 grammes pour 100 d'albumine. Les eaux mères, concentrées davantage, donnent encore une nouvelle cristallisation moins importante, que l'on peut joindre à la première; puis elles finissent par laisser un volumineux sirop incristallisable à moins d'un traitement ultérieur B.

Cristaux A. — Il est facile de reconnaître dans le dépôt cristallisé A la présence de la tyrosine; il suffit de le traiter par un mélange froid ou tiède de 4 parties d'eau et de 1 partie d'alcool. La tyrosine reste insoluble et peut être obtenue pure par dissolution à chaud dans l'ammoniaque caustique et concentration de la liqueur; elle se sépare alors sous forme d'aiguilles isolées ou groupées en houppes. Lorsque la cristallisation se fait lentement, on l'obtient en longues aiguilles prismatiques isolées. Toutes les fois qu'un dépôt cristallin contient de la tyrosine, il suffit de laisser évaporer lentement sur le porte-objet du microscope quelques gouttes de la solution aqueuse pou

observer nettement les formes particulières à ce corps. Parmi les produits cristallisables fournis par la décomposition des matières albuminoïdes, la tyrosine offre seule l'apparence microscopique de fines aiguilles prismatiques groupées ou isolées, quelquefois aussi de bâtonnets courts si le produit est impur. Tous les autres corps cristallisent, soit en lames plates, soit en boules, soit en grains arrondis formés par le groupement autour d'un centre d'aiguilles courtes plus ou moins aplaties. Du reste, la réaction si caractéristique de la tyrosine avec le nitrate mercureux (réactif de Millon) permet de constater dans un liquide la présence de traces de tyrosine. 1 milligramme dissous dans 1 centimètre cube d'eau fournit encore une coloration rose très-prononcée lorsqu'on chauffe légèrement avec quelques gouttes de nitrate mercureux acide. Avec des doses plus fortes de tyrosine, il se développe une coloration rouge brun foncé, suivie d'un dépôt rouge brun.

Lorsqu'une liqueur donne par cette réaction un résultat positif, il suffit de la concentrer à un degré convenable et d'y semer après refroidissement quelques parcelles de cristaux de tyrosine pour déterminer la formation, au bout de quelques heures, d'un dépôt floconneux formé d'un feutrage de fines aiguilles de tyrosine. Cette méthode est excellente pour éliminer la tyrosine de solutions qui en renferment très-peu, à côté d'autres produits cristallisables, tels que la leucine.

J'ai cherché un grand nombre de fois à déterminer le poids de tyrosine fourni par 100 grammes d'albumine. Les nombres obtenus oscillent entre 2,5 et 3,5 pour 100. Le dosage peut s'effectuer de la manière suivante : le résidu fixe, complétement privé de baryte, est séché dans le vide, puis traité par un mélange froid de 4 parties d'eau et de 1 partie d'alcool. La portion non dissoute est reprise par l'eau ammoniacale bouillante ; on filtre et l'on concentre pour chasser l'ammoniaque. La tyrosine, dé-

posée après refroidissement, est exprimée dans un linge de batiste, séchée et pesée; on ajoute au poids ainsi trouvé celui des petites quantités de tyrosine qui se séparent, pendant les cristallisations fractionnées, des produits contenus dans la solution aqueuse alcoolique.

Le nombre 3,4, obtenu dans les expériences les plus soignées, conduit pour l'albumine à un poids moléculaire assez élevé, et égal environ à 5500, si l'on veut faire entrer une molécule entière de tyrosine (181) dans l'équation de décomposition.

L'influence de cette faible dose de tyrosine sur les résultats de l'analyse élémentaire du résidu fixe est peu sensible, comme on peut s'en assurer facilement par un calcul; elle sort à peine des limites de variation dans les résultats des diverses analyses élémentaires du même résidu fixe.

La *leucine* s'obtient pure, par des cristallisations répétées dans l'eau, du premier dépôt cristallisé A fourni par la liqueur primitive; il convient de décolorer par le noir animal, après séparation de la majeure partie de la tyrosine par le procédé indiqué plus haut. Lorsque la leucine a été ainsi amenée à un certain degré de pureté, sa solution aqueuse cristallise déjà à chaud pendant la concentration. On voit se former, à la surface et contre les parois de la capsule, des croûtes blanches composées de lames brillantes et nacrées. Par le refroidissement, le liquide se prend en masse de lames semblables; les eaux mères concentrées en fournissent encore un peu.

La leucine, ainsi purifiée, est parfaitement blanche, en beaux et larges feuillets minces, nacrés; elle est peu soluble à froid dans l'eau, presque insoluble dans l'alcool froid, plus soluble dans l'alcool bouillant, qui l'abandonne par le refroidissement en lames nacrées; sa saveur est faible, très-légèrement sucrée. Chauffée dans un tube, au bain d'huile, ou sur un bec Bunsen, elle se sublime sans fondre

et sans laisser de résidu, à partir de 200 degrés. Projetée sur une lame de platine préalablement chauffée, elle émet d'abondantes fumées blanches, qui se réunissent en flocons lanugineux. Sa solution aqueuse ne précipite pas par le nitrate mercurique acide ; évaporée lentement sur le porte-objet du microscope, elle donne des houppes composées de larges lames aplaties partant d'un centre, et jamais de boules arrondies. Cette forme de feuillets, obtenus par l'évaporation de la solution aqueuse, est caractéristique de la *leucine pure;* celle qui donne des boules est toujours impure et fournit à l'analyse un déficit d'hydrogène.

J'ai eu l'occasion de faire, dans le courant de mes recherches, un assez grand nombre de combustions de leucine; je n'en donne ici que quelques-unes, pour montrer qu'elles répondent à la formule $C^6H^{13}AzO^2$:

(*a*)	Matière	0,308
	Acide carbonique	0,6145
	Eau	0,277
(b_1)	Matière	0,640
	Acide carbonique	1,290
	Eau	0,564
(b_2)	Matière	0,7865
	Volume d'azote mesuré	80^{cc}
	H	758^{mm}
	T	$24°,5$
	Volume calculé	$70^{cc},4$

En centièmes, on a :

	a.	b_1.	b_2.	$C^6H^{13}AzO^2$
Carbone	54,4	54,97	»	54,9
Hydrogène	9,9	9,79	»	9,9
Azote	»	»	11,2	10,68
Oxygène	»	»	»	»

Ce n'est, du reste, qu'en analysant des produits d'une grande pureté et cristallisés plusieurs fois dans l'eau, que

l'on trouve les nombres qui concordent avec la formule de la leucine.

Dans la plupart des cas, les analyses faites sur des cristallisations fractionnées, dérivées du premier dépôt A, offrant une apparence déjà très-respectable d'homogénéité et de pureté, ont donné des résultats conduisant soit à une expression de la forme $C^n H^{2n} Az^2 O^4$, soit à une expression de la forme $C^m H^{2m+1} Az O^2 + C^m H^{2m} Az O^2$ (n étant compris entre 10 et 12 et m entre 5 et 6).

Ces analyses se rapportent évidemment à des mélanges de composés amidés voisins. Nous verrons plus loin que l'acide amidovalérique ou butalanine existe dans les cristallisations A; sa présence expliquerait pourquoi le carbone a été trouvé souvent intermédiaire entre 5 et 6 pour 1 atome d'azote, mais elle ne rend pas compte de l'abaissement de l'hydrogène au-dessous du rapport $C^n H^{2n+1}$.

La cristallisation A, traitée par l'alcool bouillant à 92 pour 100, a fourni une solution qui, concentrée et refroidie, a laissé déposer des feuillets minces nacrés, dont voici l'analyse :

(*a*)	Matière	0,2975
	Acide carbonique	0,600
	Eau	0,240
(b_1)	Matière	0,301
	Acide carbonique	0,601
	Eau	0,242
(b_2)	Matière	0,355
	Acide sulfurique normal à 1 équivalent par litre (49 grammes), nécessaire pour saturer l'ammoniaque dégagée sous l'influence de la chaux sodée	$2^{cc},8$
(*c*)	Matière	0,249
	Acide carbonique	0,4945
	Eau	0,2025

En centièmes, on a :

	a_1.	b_1.	b_2.	c.
Carbone	55,0	54,48	»	54,10
Hydrogène	8,9	8,95	»	9,03
Azote	»	»	11,0	»
Oxygène	»	»	»	»

Ces nombres se rapprochent sensiblement de ceux déduits de la formule

$$C^{11}H^{22}Az^2O^4 \quad \text{ou} \quad C^6H^{12}AzO^2 + C^5H^{10}AzO^2,$$

qui exige :

Carbone	53,66
Hydrogène	8,90
Azote	11, 3
Oxygène	»

Il en est de même des analyses suivantes, faites avec des produits similaires :

(*d*)	Matière	0,432
	Acide carbonique	0,863
	Eau	0,344
(e_1)	Matière	0,2885
	Acide carbonique	0,568
	Eau	0,230
(e_2)	Matière	0,322
	Acide sulfurique normal saturé par l'ammoniaque	2^{cc},4
(*f*)	Matière	0,2535
	Acide carbonique	0,496
	Eau	0,203

En centièmes, on a :

	d.	e_1.	f.	e_2.
Carbone	54,47	53,70	53,41	»
Hydrogène	8,84	8,85	8,89	»
Azote	»	»	»	10,4
Oxygène	26,29	»	»	»

D'autres analyses de produits analogues ont fourni :

(*g*)	Matière	0,2715
	Acide carbonique	0,547
	Eau	0,234
(*h*)	Matière	0,2255
	Acide carbonique	0,450
	Eau	0,192
(*i*)	Matière	0,2165
	Acide carbonique	0,429
	Eau	0,183
(*j*)	Matière	0,2925
	Acide carbonique	0,574
	Eau	0,2515
(*k*)	Matière	0,2750
	Acide carbonique	0,560
	Eau	0,240
(*l*)	Matière	0,2765
	Acide carbonique	0,5485
	Eau	0,2375

En centièmes, on a :

	g.	*h.*	*i.*	*j.*	*k.*	*l.*
Carbone	54,90	54,4	54,04	53,5	55,5	54,
Hydrogène	9,57	9,45	9,34	9,49	9,6	9,
Azote	»	»	»	»	»	»
Oxygène		»	»	»	»	»

Les analyses *g* à *l* se rapportent assez exactement à d
mélanges à équivalents égaux d'un corps de form
$C^{11}H^{22}Az^{2}O^{4}$ avec de la leucine $C^{6}H^{13}AzO^{2}$,

$$C^{11}H^{22}Az^{2}O^{4} + C^{6}H^{13}AzO^{2} = C^{17}H^{35}Az^{3}O^{6},$$

qui exige :

Carbone	54,1
Hydrogène	9,28
Azote	»

L'expérience suivante démontre nettement que la cristallisation aqueuse A est presque exclusivement formée de tyrosine et de corps de formules

$$C^mH^{2m+1}AzO^2 \quad \text{et} \quad C^nH^{2n}Az^2O^4,$$

m étant égal à 5 ou 6 et *n* égal à 10 ou 12.

Cette cristallisation A a été redissoute dans l'eau chaude, et la liqueur, concentrée progressivement, a fourni, après refroidissement, des dépôts cristallins successifs. Le premier se composait d'un mélange de tyrosine et de leucine en lames (*voir* les analyses ci-dessus). Le deuxième a fourni à l'analyse :

(*a*)	Matière	0,2795
	Acide carbonique	0,535
	Eau	0,242

En centièmes :

Carbone	52,20
Hydrogène	9,66

Le rapport de C à H est égal à $n : 2n + 1$; ce dépôt rentre donc dans la formule générale $C^nH^{2n+1}AzO^2$. C'est un mélange de leucine et de butalanine dominante. En effet, on a :

	$C^6H^{13}AzO^2$.	$C^5H^{11}AzO^2$.
Carbone	54,96	51,2
Azote	9,92	9,4

Le troisième dépôt cristallin a donné :

(*b*)	Matière	0,504
	Acide carbonique	0,962
	Eau	0,413

En centièmes :

Carbone	52,0
Hydrogène	9,1

nombres très-voisins de ceux exigés par la formule $C^{10}H^{20}Az^{2}O^{4}$, qui sont :

Carbone	51,7
Hydrogène	8,6

En admettant la présence très-probable d'un peu de leucine ou de butalanine, on explique le léger excès trouvé de carbone et d'hydrogène.

Cette conclusion est justifiée par l'analyse du quatrième dépôt cristallin, qui a donné :

(*c*)	Matière	0,347
	Acide carbonique	0,651
	Eau	0,2695

En centièmes, on a :

Carbone	51,3
Hydrogène	8,64

nombres correspondant à la formule $C^{10}H^{20}Az^{2}O^{4}$.

Enfin, la dernière cristallisation fractionnaire du dépôt A a fourni des nombres qui concordent avec ceux de l'acide amidobutyrique $C^{4}H^{9}AzO^{2}$.

(*d*)	Matière	0,471
	Acide carbonique	0,817
	Eau	0,362

En centièmes, on a :

	d.	$C^{4}H^{9}AzO^{2}$.
Carbone	47,3	46,6
Hydrogène	8,5	8,7

Dans les expériences faites sur 100 grammes d'albumine, il n'est pas possible de pousser le fractionnement par cristallisations successives plus loin que ne l'indiquent les analyses précédentes. Elles prouvent que le dépôt A est formé de tyrosine, d'acides amidés répondant à la formule générale $C^{m}H^{2m+1}AzO^{2}$, pour lesquels *m* est égal à 6, 5 et

4, ainsi que de composés répondant à la formule générale $C^mH^{2m}AzO^2$ ou plutôt $C^nH^{2n}Az^2O^4$ ($n = 12$ ou 10). Ces corps doivent-ils être envisagés comme des principes immédiats définis, ou comme des mélanges, ou plutôt comme des combinaisons de termes du type $C^nH^{2n+1}AzO^2$ avec des termes moins hydrogénés, appartenant soit au type

$$C^nH^{2n-1}AzO^2,$$

soit au type

$$C^nH^{2n-3}AzO^2.$$

L'apparition, très-fréquente dans nos analyses, des corps du type $C^nH^{2n}Az^2O^4$ ne permet pas d'attribuer ce résultat au hasard seul. Évidemment ces corps existent par eux-mêmes ou tout au moins résultent de l'union à équivalents égaux des acides amidés $C^nH^{2n+1}AzO^2$, que j'appellerai *leucines*, avec des corps du type $C^nH^{2n-1}AzO^2$, auxquels je donnerai le nom de *leucéines*.

Pour décider cette question, j'ai cherché à isoler par cristallisations fractionnées des termes en $C^nH^{2n-1}AzO^2$, en faisant porter mes efforts sur une plus grande quantité de matière.

10 kilogrammes d'albumine ayant été décomposés par la baryte dans un grand autoclave, et le liquide ayant été successivement privé d'ammoniaque et de l'excès de baryte par un courant d'acide carbonique et par l'acide sulfurique, puis concentré à cristallisation, on a pu isoler 2 kilogrammes environ de dépôts cristallisés correspondant au dépôt A.

De cette masse assez notable de substance je n'ai retiré, par des cristallisations fractionnées et poussées avec soin jusqu'aux dernières limites, que : 1° les substances déjà mentionnées, tyrosine, leucine, butalanine, acide amidobutyrique, composés cristallins du type $C^mH^{2m}Az^2O^4$ ($m = 12$ et 10); 2° deux nouveaux produits définis et cristallisables, dont l'un, auquel je donne le nom de *tyroleucine*, répond

à la formule $C^7H^{11}AzO^2$, et dont l'autre rentre dans le type $C^nH^{2n-1}AzO^2$; sa composition est représentée par la formule $C^6H^{11}AzO^2$; c'est une leucéine ($n = 6$), leucéine caproïque.

La tyroleucine appartient au type $C^nH^{2n-8}AzO^2$; elle ne joue qu'un rôle très-secondaire dans la constitution de l'albumine, car elle n'apparaît qu'en faibles proportions dans les produits de son dédoublement. Avec 100 grammes de matière, j'avais complétement méconnu sa présence. L'opération de 10 kilogrammes m'a permis d'en extraire environ 60 à 70 grammes purs.

L'existence bien démontrée d'un terme défini et cristallisé du type $C^nH^{2n-1}AzO^2$ tend à prouver que les composés si abondants du type $C^mH^{2m}Az^2O^4$ doivent être envisagés comme des combinaisons moléculaires de leucines et de leucéines.

L'expérience suivante semble cependant démontrer que les composés $C^mH^{2m}Az^2O^4$ ($m = 10$ ou 12) ne se laissent pas toujours scinder, par cristallisation fractionnée, en leucines $C^nH^{2n+1}AzO^2$ et en leucéines $C^nH^{2n-1}AzO^2$. Un dépôt cristallisé en boules ou en mamelons rayonnés d'un centre avait donné :

(*a*)	Matière....................	0,3495
	Acide carbonique....	0,707
	Eau..........................	0,286

Ces cristaux, redissous dans l'eau et purifiés par une nouvelle cristallisation, ont donné :

(*b*)	Matière.......................	0,3105
	Acide carbonique..............	0,631
	Eau..........................	0,251

En centièmes, on a :

	a.	*b*.	$C^{12}H^{24}Az^2O^4$.
Carbone....... ...	55,1	55,42	55,38
Hydrogène........	9,09	9,01	9,2

La composition n'a donc pas changé, et l'on est conduit à admettre l'existence propre d'un corps répondant à la formule $C^{12}H^{24}Az^2O^4$ ($m = 12$).

Ce résultat a été vérifié dans mainte occasion, non-seulement pour le composé $C^{12}H^{24}Az^2O^4$, mais encore pour les termes homologues inférieurs $C^{11}H^{22}Az^2O^4$, $C^{10}H^{20}Az^2O^4$, $C^9H^{18}Az^2O^4$, que nous retrouverons plus loin. La tyroleucine ($C^7H^{11}AzO^2$) et la leucéine caproïque ($C^6H^{11}AzO^2$), ont été extraites de la solution aqueuse du dépôt cristallisé A de l'opération de 10 kilogrammes, en séparant d'abord, par des concentrations successives suivies de refroidissement, la majeure partie de la tyrosine et de la leucine. Les eaux mères, débarrassées d'un peu de baryte par l'acide sulfurique, ont été décolorées par le noir animal, puis concentrées à nouveau. Il s'est formé un dépôt assez abondant formé de boules arrondies, d'où l'on a pu extraire une quantité notable des deux nouveaux corps. Ce dépôt a été repris par l'eau chaude, qui l'a dissous, sauf un résidu de tyrosine; le liquide, assez foncé, a été décoloré en y ajoutant du sous-acétate de plomb, filtrant pour séparer des flocons bruns, précipitant l'excès de plomb par l'hydrogène sulfuré, filtrant et décolorant par le noir animal. Deux concentrations successives ont donné deux cristallisations B et C en boules ou en grains.

Les cristaux B, purifiés par des solutions dans l'eau suivies de concentration, ont fourni un produit de composition définie, comme le montrent les analyses suivantes, faites sur des dépôts successifs obtenus en concentrant à plusieurs reprises les eaux mères et en laissant refroidir :

(a_1)	Matière	0,3095
	Acide carbonique	0,6705
	Eau	0,228

(a_2)	Matière	0,6225
	Volume d'azote mesuré	$52^{cc},5$
	H	760^{mm}
	T	15°
	Volume calculé	48,7
(a_3)	Matière	0,385
	Volume d'azote mesuré	$33^{cc},7$
	H	756^{mm}
	T	19°
	Volume calculé	$30^{cc},66$
(b)	Matière	0,3685
	Acide carbonique	0,805
	Eau	0,269
(c)	Matière	0,346
	Acide carbonique	0,755
	Eau	0,250
(d)	Matière	0,358
	Acide carbonique	0,776
	Eau	0,265
(e)	Matière	0,761
	Acide carbonique	1,625
	Eau	0,538

En centièmes, on a :

	a_1.	a_2.	a_3.	b.	c.	d.	e.	$C^7H^{11}Az$
Carbone...	59,08	»	»	59,5	59,5	59,11	58,2	59,5
Hydrogène.	8,18	»	»	8,1	8,02	8,11	7,88	7,8
Azote.....	»	9,8	10,00	»	»	»	»	9,9
Oxygène..	»	»	»	»	»	»	»	22,8

La tyroleucine se dépose en boules plus ou moins volumineuses, à surface cannelée, les cannelures rayonnant d'un centre, formées d'aiguilles courtes et prismatiques ; elle est blanche, terne et sans éclat, d'aspect crayeux. Sur le porte-objet du microscope, sa solution aqueuse cris-

tallise en boules ou en mamelons. Sa saveur est nulle ou à peu près. L'eau en dissout, vers 15 degrés, environ 5 pour 100 de son poids; elle est peu soluble dans l'alcool.

A 240 degrés, la tyroleucine fond en se décomposant et en donnant un sublimé blanc, en même temps qu'un résidu jaune clair et vitreux, fondu. Avec les réactifs de Millon et de Piria, elle ne donne pas les colorations de la tyrosine quand celle-ci a été bien écartée. Chauffée sur une lame de platine avec quelques gouttes d'acide nitrique, elle donne une coloration jaune, devenant brune après addition de potasse. Projetée en petites quantités et en poudre sur une lame de platine suffisamment chaude, elle se volatilise, sans résidu, sous forme de fumées blanches.

Sous l'influence d'une température de 250 à 280 degrés, dans une atmosphère d'un gaz inerte, elle se décompose en donnant un sublimé blanc, de l'eau, de l'acide carbonique et une base huileuse, volatile, à odeur de raifort. Il reste dans la cornue une masse amorphe, transparente, et de cassure résineuse.

D'après l'analyse de son chloroplatinate, la base huileuse a pour formule $C^8H^{11}Az$ et représente de la collidine ou un isomère. Le résidu vitreux a donné des nombres conduisant à la formule $C^{14}H^{18}Az^2O^2$. D'après ces résultats, on peut admetre que la tyroleucine, chauffée au-dessus de 250 degrés, se déshydrate en partie en se polymérisant, tandis qu'une autre portion se décompose en acide carbonique, en collidine et en butalanine, d'après l'équation

$$2\,C^7H^{11}AzO^2 = CO^2 + C^8H^{11}Az + C^5H^{11}AzO^2.$$

La déshydratation se ferait d'après l'équation

$$2\,C^7H^{11}AzO^2 = 2\,H^2O + C^{14}H^{18}Az^2O^2.$$

On est conduit ainsi à envisager la tyroleucine comme un composé de butalanine $C^5H^{11}AzO^2$ avec un corps, de formule $C^9H^{11}AzO^2$, ne différant de la tyrosine que par

1 atome d'oxygène. Ce rapprochement est appuyé par ce fait que la tyrosine, chauffée dans les mêmes conditions, se dédouble en acide carbonique et en une base oxygénée $C^8H^{11}AzO$, qui ne diffère de la collidine que par 1 atome d'oxygène en plus.

Analyses du chloroplatinate de la base volatile.

(a_1)	Matière séchée à 100 degrés......	0,284
	Platine........................	0,085
(b_1)	Matière séchée à 100 degrés......	0,380
	Platine........................	0,1155
(a_2)	Matière........................	0,2325
	Chlorure d'argent..............	0,312
(a_3)	Matière........................	0,228
	Acide carbonique...............	0,229
	Eau............................	0,080
(b_2)	Matière........................	0,546
	Acide carbonique...............	0,590
	Eau............................	0,1935

En centièmes, on a :

	a_1.	b_1.	a_2.	a_3.	b_2.	$PtCl^4(C^8H^{11}Az,ClH)^2$.
Carbone...	»	»	»	27,39	29,4	29,30
Hydrogène.	»	»	»	3,89	3,93	3,66
Platine....	29,92	30,3	»	»	»	30,2
Chlore.....	»	»	32,47	»	»	32,5
Azote.....	»	»	»	»	»	4,27

Analyses du résidu fixe amorphe fourni par l'action de la chaleur sur la tyroleucine.

(a_1)	Matière..................	0,356
	Acide carbonique..........	0,904
	Eau......................	0,237

(a_2)	Matière	0,504
	Volume d'azote mesuré	43^{cc},5
	H	753^{mm}
	T	10°
	Volume calculé	41^{cc},06

En centièmes, on a :

	a_1.	a_2.	$C^{14}H^{11}Az^2O^4$.
Carbone	69,22	»	68,3
Hydrogène	7,39	»	7,3
Azote	»	10,2	11,3
Oxygène	»	»	»

L'action de la chaleur sur la tyroleucine confirme donc la formule que nous avons attribuée à ce corps.

La cristallisation C, formée dans l'eau mère concentrée des cristaux B qui ont fourni la tyroleucine, analysée telle quelle, a donné :

(a_1)	Matière	0,385
	Acide carbonique	0,7605
	Eau	0,295
(a_2)	Matière	0,420
	Volume d'azote mesuré	42^{cc},7
	H	758^{mm}
	T	17°,5
	Volume calculé	39^{cc},4

En centièmes, on a :

	a_1.	a_2.
Carbone	53,8	»
Hydrogène	8,51	»
Azote	»	11,70
Oxygène	»	»

En soumettant ce dépôt C à une cristallisation fractionnée dans l'eau, on a obtenu un premier dépôt donnant :

(a_1)	Matière	0,400
	Acide carbonique	0,809
	Eau	0,312

(a_2)	Matière	0,434
	Volume d'azote mesuré	$39^{cc},2$
	H	752^{mm}
	T	17°
	Volume calculé	35,8

En centièmes, on a :

	a_1.	a_2.
Carbone	55,16	»
Hydrogène	8,66	»
Azote	»	10,3
Oxygène	»	»

Les cristallisations suivantes ont donné successivement les nombres :

2e dépôt.	(b)	Matière	0,279
		Acide carbonique	0,566
		Eau	0,220
3e dépôt.	(c)	Matière	0,2615
		Acide carbonique	0,538
		Eau	0,2055
4e dépôt.	(d)	Matière	0,286
		Acide carbonique	0,597
		Eau	0,2215

En centièmes, on a :

	b.	c.	d.
Carbone	55,32	56,11	56,9
Hydrogène	8,76	8,73	8,60

Les trois derniers dépôts (b, c, d) ont été réunis à nouveau, et le tout a été soumis à des cristallisations fractionnées.

La première cristallisation a donné :

(a)	Matière	0,3265
	Acide carbonique	0,6835
	Eau	0,252

La deuxième a donné :

(*b*)	Matière	0,3155
	Acide carbonique	0,653
	Eau	0,2465

En centièmes, on a :

	a.	*b.*
Carbone	57,0	56,44
Hydrogène	8,57	8,68

Il est évident, d'après cela, que les cristaux C correspondent en grande partie à un principe défini. Les analyses conduisent à la formule $C^6H^{11}AzO^2$, qui exige :

Carbone	55,81
Hydrogène	8,52
Azote	10,80
Oxygène	24,79

Le petit excès de carbone trouvé dans certaines analyses tient à la présence d'un peu de tyroleucine avec laquelle la leucéine caproïque se trouvait mélangée au début. Ainsi certaines cristallisations obtenues dans le traitement préparatoire ont donné des nombres intermédiaires :

(*a*)	Matière	0,3155
	Acide carbonique	0,667
	Eau	0,2355

En centièmes, on a :

Carbone	57,6
Hydrogène	8,3

Les eaux mères de purification des cristaux C, après avoir fourni une série de cristallisations très-voisines de $C^6H^{11}AzO^2$ ou de mélanges de $C^6H^{11}AzO^2$ avec de la ty-

roleucine, ont fini par abandonner un dernier dépôt, dont l'analyse a donné :

Matière................	0,3525
Acide carbonique.......	0,667
Eau..................	0,288

En centièmes, on a :

Carbone................	51,57
Hydrogène..............	9,07

nombres se rapprochant beaucoup de ceux de la butalanine.

La leucéine caproïque cristallise en grains formés d'aiguilles groupées autour d'un centre; elle est plus soluble dans l'eau que la leucine, soluble dans l'alcool bouillant, de saveur faiblement sucrée. Projetée en poudre sur une lame de platine suffisamment chaude, elle se volatilise sans résidu; mais, si on la chauffe dans un tube en fragments plus gros, elle fond et laisse un résidu de charbon.

Nous avons déjà signalé la présence de la butalanine, accompagnée de tyrosine, de tyroleucine, de leucine et de leucéine caproïques, ainsi que des corps intermédiaires $C^mH^{2m}Az^2O^4$ ($m = 12$, 11 et 10), dans les premières cristallisations aqueuses A du liquide primitif; mais c'est surtout dans les eaux mères qu'il convient de la chercher; elle y est associée à de fortes proportions de leucine butyrique $C^4H^9AzO^2$, de traces d'alanine, ainsi que de termes homologues inférieurs des séries $C^mH^{2m}Az^2O^4$, $C^nH^{2n-1}AzO^2$ ($m = 10$ à 7; $n = 5$ et 4). Tous ces corps sont, en effet, beaucoup plus solubles dans l'eau que les précédents.

L'*eau mère B* des dépôts A est complétement privée de baryte par l'acide sulfurique, puis évaporée à sec, et le résidu est épuisé par l'alcool fort bouillant, qui le dissout presque en entier et laisse déposer des cristaux par refroidissement.

La butalanine $C^5H^{11}AzO^2$ et l'acide amidobutyrique $C^4H^9AzO^2$ ont une certaine tendance à cristalliser ensemble dans les rapports des équivalents, surtout lorsqu'ils se séparent d'une solution alcoolique. Un grand nombre d'analyses faites sur des dépôts cristallins formés au sein de l'alcool ayant servi à épuiser l'eau mère desséchée des cristaux A ont fourni des nombres se rapportant à des combinaisons doubles semblables. La séparation peut néanmoins s'effectuer en employant l'eau comme dissolvant. La solution de ces cristaux mixtes

$$C^9H^{20}Az^2O^4 = C^5H^{11}AzO^2 + C^4H^9AzO^2$$

est décolorée par le noir animal et concentrée à température peu élevée dans le vide. La butalanine se sépare pendant l'ébullition sous forme de feuillets blancs qui rappellent la leucine caproïque; cette dernière se dépose également s'il en reste. Enfin les eaux mères fortement concentrées fournissent des cristaux d'acide amidobutyrique.

Le composé mixte cristallise dans l'alcool sous forme de houppes.

Les analyses suivantes se rapportent à des mélanges de butalanine et d'acide amidobutyrique obtenus dans des conditions analogues aux précédentes :

(a_1)	Matière	0,434
	Acide carbonique	0,778
	Eau	0,350
(a_2)	Matière	0,450
	Acide sulfurique normal (1 équivalent ou 49 grammes par litre) employé à saturer l'ammoniaque dégagée par la chaux sodée	$4^{cc},1$
(b_1)	Matière	0,372
	Acide carbonique	0,668
	Eau	0,2955

(c_1)	Matière	0,307
	Acide carbonique	0,551
	Eau	0,241
(d_1)	Matière	0,306
	Acide carbonique	0,545
	Eau	0,242
(e_1)	Matière	0,276
	Acide carbonique	0,5085
	Eau	0,223
(f_1)	Matière	0,400
	Acide carbonique	0,723
	Eau	0,325
(f_2)	Matière	0,433
	Volume d'azote mesuré	50^{cc}
	H	758^{mm}
	T	$17^{\circ},5$
	Volume calculé	46^{cc}

En centièmes, on a :

	a_1.	a_2.	b_1.	c_1.	d_1.	e_1.	f_1.	f_2.	C
Carbone	48,88	»	48,97	48,95	48,57	49,8	49,29	»	
Hydrogène	8,95	»	8,80	8,72	8,78	8,9	9,01	»	
Azote	»	12,75	»	»	»	»	»	13,34	
Oxygène	28,97	»	»	»	»	»	»	»	

C'est ce mélange ou cette combinaison qui se scinde ; la concentration dans le vide de sa solution aqueuse cristaux de butalanine qui se déposent pendant l'ébullit à basse température (40-50 degrés), et en acide ami butyrique qui ne cristallise que dans une liqueur as concentrée.

Les analyses suivantes se rapportent à des cristaux butalanine plus ou moins purs :

(a_1)	Matière	0,306
	Acide carbonique	0,569
	Eau	0,253

(b_1)	Matière	0,3145
	Acide carbonique	0,583
	Eau	0,2595
(c_1)	Matière	0,322
	Acide carbonique	0,5925
	Eau	0,258
(d_1)	Matière	0,3425
	Acide carbonique	0,651
	Eau	0,285
(e_1)	Matière	0,3525
	Acide carbonique	0,667
	Eau	0,288
(f_1)	Matière	0,358
	Acide carbonique	0,680
	Eau	0,3065
(g_1)	Matière	0,3565
	Acide carbonique	0,654
	Eau	0,284
(h_1)	Matière	0,3515
	Acide carbonique	0,678
	Eau	0,298
(h_2)	Matière	0,411
	Volume d'azote mesuré	$43^{cc},6$
	H	757^{mm}
	T	20°
	Volume calculé	$39^{cc},5$
(g_2)	Matière	0,296
	Volume d'azote mesuré	$30^{cc},8$
	H	750^{mm}
	T	16°
	Volume calculé	28^{cc}
(f_2)	Matière	0,3635
	Volume d'azote mesuré	$37^{cc},2$
	H	750^{mm}
	T	18°
	Volume calculé	$33^{cc},7$

En centièmes, on a :

	a_1.	b_1.	c_1.	d_1.	e_1.	f_1.	f_2.	g_1.	g_2.	h_1.
Carbone...	50,75	50,55	50,1	51,83	51,8	51,8	»	50,03	»	52,6
Hydrogène..	9,15	9,1	8,86	9,24	9,07	9,5	»	8,85	»	9,4
Azote......	»	»	»	»	»	»	11,65	»	11,8	»
Oxygène...	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

La formule $C^8H^{11}AzO^2$ exige :

Carbone..............	51,28
Hydrogène............	9,4
Azote................	11,96
Oxygène..............	27,45

Dans un certain nombre de ces analyses, l'hydrogène est un peu faible, comme pour la leucine caproïque. Ceci tient à la difficulté que l'on éprouve à éliminer complétement les termes des séries moins hydrogénées $C^mH^{2m}Az^2O^4$ et $C^nH^{2n-1}AzO^2$.

La butalanine ressemble beaucoup à la leucine; elle est presque aussi volatile, plus soluble dans l'eau. Elle cristallise sur le porte-objet en mamelons formés d'aiguilles courtes rayonnant d'un centre, et non en lames plates. Sa saveur est un peu sucrée. La solution aqueuse de butalanine ne précipite pas par le nitrate mercurique ni par l'acétate et le sous-acétate de plomb.

L'acide amidobutyrique, ou leucine butyrique, a été isolé d'une manière constante et en proportions notables du résidu fixe, dont il forme une fraction importante. Les analyses suivantes se rapportent à des produits cristallisés de diverses origines, plus ou moins purs et plus ou moins mélangés de butalanine :

(a_1)	Matière.....................	0,2785
	Acide carbonique...........	0,483
	Eau.........................	0,219
(b_1)	Matière.....................	0,335
	Acide carbonique............	0,5675
	Eau.........................	0,260

(c_1)	Matière	0,267
	Acide carbonique	0,462
	Eau	0,206
(d_1)	Matière	0,440
	Acide carbonique	0,755
	Eau	0,341
(e_1)	Matière	0,4065
	Acide carbonique	0,694
	Eau	0,317
(e_2)	Matière	0,290
	Volume d'azote mesuré	$33^{cc},4$
	H	758^{mm}
	T	18°
	Volume calculé	$30^{cc},45$
(d_2)	Matière	0,319
	Volume d'azote mesuré	$36^{cc},4$
	H	749^{mm}
	T	14°
	Volume calculé	$33^{cc},65$

En centièmes, on a :

	a_1.	b_1.	c_1.	d_1.	d_2.	e_1.	e_2.	$C^4H^9AzO^2$.
arbone...	47,3	46,2	47,4	46,69	»	46,56	»	46,6
ydrogène.	8,7	8,6	8,57	8,59	»	8,6	»	8,7
zote....	»	»	»	»	13,2	»	12,96	13,5
xygène...	»	»	»	»	»	»	»	»

L'acide amidobutyrique cristallise, par le refroidissement de sa solution alcoolique, en petits feuillets minces, nacrés, assez semblables à la leucine; il est presque insoluble à froid dans ce liquide, plus soluble à chaud, assez soluble dans l'eau, d'où il ne cristallise qu'en solutions assez concentrées, sous forme de mamelons composés d'aiguilles groupées autour d'un centre. Sa saveur est plus sucrée que celle de la leucine et de la butalanine. Projeté en poudre sur une lame de platine suffisamment chaude,

il se volatilise sans laisser de résidu; mais, en masses plus considérables, il fond en se décomposant, se sublime partiellement et laisse un résidu charbonneux abondant.

Parmi les composés amidés homologues de la leucine, j'ai encore rencontré, mais en petites quantités seulement, l'alanine $C^3H^7AzO^2$, ou leucine propionique; elle a été caractérisée par l'apparence de ses cristaux et par sa composition centésimale. On la trouve dans les portions du résidu fixe insolubles dans l'alcool absolu :

(a_1)	Matière	0,339
	Acide carbonique	0,500
	Eau	0,243
(a_2)	Matière	0,3205
	Volume d'azote mesuré	43^{cc}
	H	762^{mm}
	T	11°
	Volume calculé	$40^{cc},8$

En centièmes, on a :

	a_1.	a_2.	$C^3H^7AzO^2$.
Carbone	40,22	»	40,45
Hydrogène	7,96	»	7,86
Azote	»	15,99	15,70
Oxygène			

De même que dans les cristallisations A, formées par la concentration du liquide initial, nous avons rencontré, à côté des termes du type $C^nH^{2n+1}AzO^2$ ($n = 6$ et 5), d'autres produits cristallisables appartenant au type $C^nH^{2n-1}AzO^2$ ($n = 6$) et au type intermédiaire

$$C^mH^{2m}Az^2O^4 \quad (m = 12 \text{ à } 10);$$

de même nous trouvons dans les eaux mères B des cristaux A, outre les leucines $C^nH^{2n+1}AzO^2$ ($n = 5 = 4 = 3$), des leucéines $C^nH^{2n-1}AzO^2$ et des corps intermédiaires $C^mH^{2m}Az^2O^4$, pour lesquels $n = 5 = 4 = 3$ et $m = 9, 8$ et 7.

Des cristaux obtenus en traitant par l'alcool bouillant le résidu de l'évaporation à sec des eaux mères des premières cristallisations A ont donné :

(a_1)	Matière	0,318
	Acide carbonique	0,597
	Eau	0,241
(b_1)	Matière	0,319
	Acide carbonique	0,597
	Eau	0,2415
(b_2)	Matière	0,280
	Volume mesuré	$30^{cc},2$
	H	757^{mm}
	T	19°
	Volume calculé	$27^{cc},5$

Traduits en centièmes, ces nombres conduisent à la formule $C^{10}H^{20}Az^{2}O^{4}$ déjà trouvée plus haut :

	a_1.	b_1.	b_2.	$C^{10}H^{20}Az^{2}O^{4}$.
Carbone	51,20	51,03	»	51,7
Hydrogène	8,42	8,41	»	8,6
Azote	»	»	12,31	12,0
Oxygène	»	»	»	»

Des cristaux en grumeaux blancs, déposés après refroidissement dans l'alcool absolu bouilli avec le résidu du traitement précédent, ont donné :

(a_1)	Matière	0,3385
	Acide carbonique	0,604
	Eau	0,2525
(a_2)	Matière	0,5485
	Volume d'azote mesuré	$59^{cc},8$
	H	749^{mm}
	T	14°
	Volume calculé	$55^{cc},1$

Les eaux mères alcooliques de cette cristallisation, étant

concentrées et refroidies, ont fourni un second dépôt qui a donné :

(b_1)	Matière	0,290
	Acide carbonique	0,517
	Eau	0,2155

En centièmes, on a :

	a_1.	a_2.	b_1.
Carbone	48,6	»	48,6
Hydrogène	8,28	»	8,27
Azote	»	12,63	»
Oxygène	»	»	»

Une cristallisation en grains, formée par le refroidissement d'une solution alcoolique obtenue en faisant bouillir avec de l'alcool fort à 95 pour 100 le résidu de l'évaporation des eaux mères des premières cristallisations aqueuses A, a donné :

(a_1)	Matière	0,3465
	Acide carbonique	0,617
	Eau	0,2465
(a_2)	Matière	0,443
	Volume d'azote mesuré	$49^{cc},8$
	H	763^{mm}
	T	17°
	Volume calculé	$46^{cc},17$

Les eaux mères alcooliques concentrées ont donné un nouveau dépôt dont voici l'analyse :

(b_1)	Matière	0,439
	Acide carbonique	0,804
	Eau	0,338
(b_2)	Matière	0,3115
	Volume d'azote mesuré	$33^{cc},6$
	H	757^{mm}
	T	18°
	Volume calculé	$30^{cc},7$

Les eaux mères alcooliques des deux dépôts précédents, concentrées à nouveau, ont donné un dépôt cristallin dont voici l'analyse :

(c_1)	Matière	0,3165
	Acide carbonique	0,576
	Eau	0,233
(c_2)	Matière	0,367
	Volume d'azote mesuré	39cc,8
	H	752mm
	T	17°
	Volume calculé	36cc,35

Enfin, une quatrième cristallisation a donné :

(d_1)	Matière	0,371
	Acide carbonique	0,670
	Eau	0,264
(d_2)	Matière	0,335
	Volume d'azote mesuré	33cc,4
	H	756mm
	T	14°
	Volume calculé	31cc,1

Tous ces nombres, traduits en centièmes, donnent :

	a_1.	a_2.	b_1.	b_2.	c_1.	c_2.	d_1.	d_2.
Carbone	48,56	»	49,94	»	49,63	»	49,27	»
Hydrogène	7,91	»	8,55	»	8,17	»	7,90	»
Azote	»	13,09	»	12,4	»	12,44	»	11,66
Oxygène	»	»	»	»	»	»	»	»

Deux cristallisations successives en grumeaux dans l'alcool absolu, obtenues par l'épuisement du résidu de l'évaporation des eaux mères des premières cristallisations aqueuses, ont donné à l'analyse :

(a_1)	Matière	0,3215
	Acide carbonique	0,578
	Eau	0,242

(a_2)	Matière	0,4105
	Volume d'azote mesuré	47cc,4
	H	760mm
	T	13°
	Volume calculé	44cc,5
(b_1)	Matière	0,3095
	Acide carbonique	0,558
	Eau	0,2225

En centièmes, on a :

	a_1.	a_2.	b_1.
Carbone	49,0	»	49,14
Hydrogène	8,3	»	7,98
Azote	»	13,6	»
Oxygène	»	»	»

Ces cristaux ont été redissous dans l'alcool absolu bouillant. La solution a donné par refroidissement et concentration trois dépôts successifs dont voici les analyses :

(a_1)	Matière	0,280
	Acide carbonique	0,514
	Eau	0,208
(b_1)	Matière	0,209
	Acide carbonique	0,382
	Eau	0,160
(c_1)	Matière	0,3415
	Acide carbonique	0,602
	Eau	0,250

En centièmes, on a :

	a_1.	b_1.	c_1.
Carbone	50,06	49,84	48,07
Hydrogène	8,25	8,5	8,13
Azote	»	»	»
Oxygène	»	»	»

Voici encore d'autres analyses de dépôts cristallins en grumeaux obtenus dans des circonstances analogues :

(a_1)	Matière	0,558
	Acide carbonique	0,973
	Eau	0,401
(b_1)	Matière	0,314
	Acide carbonique	0,542
	Eau	0,225
(c_1)	Matière	0,2552
	Acide carbonique	0,4365
	Eau	0,1765
(c_2)	Matière	0,3445
	Volume d'azote mesuré	42^{cc}
	H	740^{mm}
	T	8°
	Volume calculé	$39^{cc},3$
(d_1)	Matière	0,239
	Acide carbonique	0,412
	Eau	0,174
(e_1)	Matière	0,3335
	Acide carbonique	0,586
	Eau	0,2375

En centièmes, on a :

	a_1.	b_1.	c_1.	c_2.	d_1.	e_1.
Carbone	47,5	47,07	46,68	»	47,0	47,9
Hydrogène	7,98	7,96	7,7	»	8,09	7,9
Azote	»	»	»	14,2	»	»
Oxygène	»	»	»	»	»	»

Dans ces diverses analyses, le rapport atomique du carbone à l'hydrogène est égal à 1 : 2, ou très-voisin; le rapport atomique de l'azote à l'oxygène se rapproche aussi très-sensiblement de 1 : 2. Ces corps rentrent donc tous

dans le type mixte $C^m H^{2m} Az^2 O^4$, *m* variant de 10 à 7. En effet, on a pour :

	$C^{10}H^{20}Az^2O^4$.	$C^9H^{18}Az^2O^4$.	$C^8H^{16}Az^2O^4$.
Carbone...	51,7	49,54	47,0
Hydrogène.	8,6	8,20	7,8
Azote......	12,0	12,84	13,7
Oxygène....	»	»	»

Lorsqu'on a épuisé un grand nombre de fois, par l'alcool absolu bouillant, le résidu de l'évaporation à sec des eaux mères des premières cristallisations aqueuses A privées de baryte par l'acide sulfurique, il reste une certaine quantité de matière insoluble, 3 à 4 pour 100 d'albumine environ. Ce produit, très-soluble dans l'eau, de saveur légèrement sucrée, abandonné à lui-même en solution aqueuse concentrée, finit par se prendre en une masse de grains cristallins.

L'analyse conduit à la formule $C^7H^{14}Az^2O^4$, qui est également du type $C^nH^{2n}Az^2O^4$. Divers échantillons de ce produit ont en effet donné :

(a_1)	Matière....................	0,338
	Acide carbonique..............	0,549
	Eau..........................	0,232
(a_2)	Matière......................	0,274
	Acide sulfurique normal, à 1 équivalent par litre, saturé par l'ammoniaque dégagée sous l'influence de la chaux sodée.......	$2^{cc},9$
(b_1)	Matière......................	0,483
	Acide carbonique..............	0,781
	Eau..........................	0,326
(b_2)	Matière......................	0,589
	Volume d'azote mesuré..........	71^{cc}
	H............................	762^{mm}
	T............................	13°
	Volume calculé.................	$66^{cc},9$

(c_1)	Matière	0,433
	Acide carbonique	0,724
	Eau	0,281

En centièmes, on a :

	a_1.	a_2.	b_1.	b_2.	c_1.	$C^7H^{14}Az^2O^4$.
Carbone	44,2	»	44,09	»	45,6	44,2
Hydrogène	7,6	»	7,49	»	7,2	7,36
Azote	»	14,8	»	14,2	»	14,7
Oxygène	»	»	»	»	»	»

Il résulte de toutes ces analyses, faites sur des produits distincts, cristallisés, extraits d'une manière constante par l'emploi des dissolvants neutres du résidu fixe, que l'existence propre de termes de la forme $C^mH^{2m}Az^2O^4$, avec des valeurs de *m* variant de 12 à 7, ne peut pas être révoquée en doute. Remarquons, en outre, que le résidu fixe lui-même donne des nombres qui conduisent à ce type de formule, avec *m* presque égal à 9, c'est-à-dire avec la valeur que l'on rencontre le plus fréquemment et le plus abondamment dans les principes immédiats extraits de ce résidu fixe. Nous donnerons à ces produits intermédiaires le nom générique de *glucoprotéines*, nom qui rappelle leur saveur sucrée.

Les glucoprotéines cristallisent moins facilement que les leucines, surtout les termes inférieurs. Elles sont très-solubles dans l'eau, de saveur sucrée, presque insolubles dans l'alcool absolu froid. L'alcool absolu bouillant les dissout en petites quantités qui se déposent sous forme de grains cristallins ou de grumeaux caséeux après refroidissement. L'alcool à 90 pour 100 les dissout assez bien, surtout à chaud.

Si ce n'étaient les leucines et les leucéines $C^nH^{2n+1}AzO^2$ et $C^nH^{2n-1}AzO^2$, dont la présence parmi les produits du dédoublement de l'albumine est établie sans conteste, on pourrait envisager le résidu fixe comme principalement

formé d'un mélange de glucoprotéines homologues, avec des valeurs de m variant de 12 à 7.

Il me reste à signaler et à établir, parmi les produits du dédoublement de l'albumine, l'existence d'un dernier composé assez important par sa masse, et qui rentre dans le type des leucéines $C^n H^{2n-1} Az O^2$.

Lorsque, dans les opérations faites avec 3 parties de baryte pour 1 partie d'albumine à 150-180 degrés pendant huit jours, on a enlevé la baryte par l'acide carbonique et l'acide sulfurique, concentré le liquide filtré à cristallisation, séparé les cristaux qui se forment en abondance, enfin évaporé à sec dans le vide les eaux mères, si l'on traite le résidu par l'alcool bouillant à 95 pour 100, il se sépare après refroidissement, du premier épuisement, une cristallisation notable d'où l'on peut extraire de la butalanine, de l'acide amidobutyrique ou un mélange des deux, ainsi que des termes mixtes de formule $C^n H^{2n} Az^2 O^4$ ($n = 11, 10, 9$). L'alcool mère concentré et ne déposant plus rien fournit, avec l'éther, un précipité visqueux, jaune clair, assez abondant, très-soluble dans l'eau et l'alcool même absolu, insoluble dans l'alcool éthéré, de saveur sucrée, un peu styptique. Il se dessèche à 120 degrés, sous forme d'une masse vitreuse, transparente et amorphe. L'analyse de ce produit, séché à 120 degrés, a donné des nombres compris entre ceux des formules $C^5 H^9 Az O^2$ et $C^4 H^7 Az O^2$, et se rapprochant quelquefois sensiblement de $C^9 H^{16} Az^2 O^4$:

(a_1)	Matière séchée à 130 degrés.....	0,369
	Acide carbonique.......... ...	0,656
	Eau..	0,235
(b_1)	Matière séchée à 130 degrés.....	0,408
	Acide carbonique.............	0,717
	Eau.......	0,269

(b_2)	Matière séchée à 130 degrés.	0,496
	Volume d'azote mesuré.........	$60^{cc},4$
	H........................	760^{mm}
	T........................	$18^{o},5$
	Volume calculé...............	$55^{cc},5$
(e_1)	Matière séchée à 130 degrés.	0,304
	Acide carbonique.............	0,531
	Eau........................	0,200
(c_2)	Matière séchée à 130 degrés.	0,481
	Volume d'azote mesuré..........	56^{cc}
	H........................	765^{mm}
	T........................	19°
	Volume calculé...............	$51^{cc},6$
(d_1)	Matière.....................	0,2845
	Acide carbonique.............	0,5215
	Eau........................	0,189

En centièmes, on a :

	a_1.	b_1.	b_2.	c_1.	c_2.	d_1.	$C^8H^{14}Az^2O^4$ ou $C^4H^7AzO^2$.	$C^9H^{16}Az^2O^4$.
rbone ..	48,4	47,9	»	47,6	»	49,9	47,5	50
'drogène.	7,0	7,3	»	7,3	»	7,3	6,9	7,4
ote.....	»	»	14,0	»	13,4	»	13,8	12,96
ygène. .	»	»	»	»	»	»	»	»

Les analyses du produit séché à 100 degrés seulement conduiraient plutôt à une formule de la forme

$$C^nH^{2n}Az^2O^5 = C^nH^{2n-2}Az^2O^4 + H^2O \quad (n = 8 \text{ ou } 9) :$$

(a_1)	Matière séchée à 100 degrés.....	0,388
	Acide carbonique.............	0,6225
	Eau........................	0,263
(a_2)	Matière séchée à 100 degrés.....	0,392
	Volume d'azote mesuré..........	$41^{cc},4$
	H........................	767^{mm}
	T........................	12°
	Volume calculé...............	$39^{cc},47$

En centièmes, on a :

	a_1.	a_2.	$C^9H^{16}Az^2O^4$.
Carbone.........	43,75	»	43,63
Hydrogène......	7,53	»	7,27
Azote..........	»	12,64	12,72

Le corps vitreux amorphe paraît, d'après cela, être constitué en grande partie par de la leucéine butyrique $C^4H^7AzO^2$ ou $2(C^4H^7AzO^2)$, à laquelle se joindrait un homologue supérieur $C^9H^{16}Az^2O^4$.

Il résulte de l'ensemble de mes observations et de mes recherches que plus l'action de la baryte est *prolongée* et énergique, plus la proportion des leucines ($C^nH^{2n+1}AzO^2$) et des leucéines ($C^nH^{2n-1}AzO^2$) isolables à l'état de liberté augmente, tandis que, dans les expériences où les conditions de température et de durée n'ont pas été trop exagérées, les corps intermédiaires ou les glucoprotéines $C^nH^{2n}Az^2O^4$ dominent dans le résidu fixe.

Ainsi, dans les expériences faites à 100 ou 115 degrés, on ne trouve guère que des glucoprotéines à côté d'un peu de leucine caproïque $C^6H^{13}AzO^2$ et de tyrosine (ces deux corps paraissent être les termes ultimes du dédoublement qui se séparent le plus facilement; aussi les a-t-on observés dans les réactions les plus ménagées).

Dans une expérience faite avec 3 parties d'hydrate de baryte à 110-120 degrés pendant quarante-huit heures, on a obtenu un liquide qui, précipité par l'acide carbonique et l'acide sulfurique, moussait fortement pendant la concentration dans le vide; il n'a fourni que très-peu de cristaux, après évaporation convenable; l'eau mère, séchée, a été épuisée par l'alcool absolu bouillant à plusieurs reprises. Ces solutions, filtrées et concentrées, ont donné à chaque fois, par refroidissement, des dépôts de grumeaux cristallins, blancs, de saveur sucrée. On a mis à part les cinq dépôts successifs ainsi obtenus. Ils offraient, du reste, des apparences et des caractères très-voisins. Le premier, le deuxième

nquième dépôt ont donné des résultats analytiques nes. On peut donc admettre qu'ils sont tous formés ule et même substance; ils représentaient, en outre, e principale du résidu fixe.

dépôt..	(a_1)	Matière..............	0,318
		Acide carbonique......	0,574
		Eau.................	0,225
	(a_2)	Matière..............	0,423
		Volume d'azote mesuré..	47cc,5
		H..................	751mm
		T..................	12°
		Volume calculé........	44cc,1
dépôt.	(b_1)	Matière..............	0,289
		Acide carbonique......	0,520
		Eau.................	0,210
dépôt.	(c_1)	Matière..............	0,380
		Acide carbonique......	0,6915
		Eau.................	0,277

entièmes, on a :

	a_1.	a_2.	b_1.	c_1.	$C^9H^{18}Az^2O^4$.
ne....	49,23	»	49,0	49,6	49,5
ogène..	7,86	»	8,08	8,09	8,2
......	»	13,0	»	»	12,8
ène....	»	»	»	»	»

s les épuisements par l'alcool absolu, il est resté un très-soluble dans l'eau qui a donné à l'analyse les s déjà cités plus haut, carbone = 45,6, H = 7,21, 4,8, correspondant à la formule $C^7H^{14}Az^2O^4$. Dans périence, on n'a donc trouvé que des glucoprotéines, plus abondante est $C^9H^{18}Az^2O^4$. D'après cela, il est que les glucoprotéines représentent les termes inie l'hydratation de l'albumine.

formerait tout d'abord $C^9H^{18}Az^2O^4$, accompagné

d'une petite quantité de $C^7H^{14}Az^2O^4$, et c'est aux dépens de ces glucoprotéines que les leucines et les leucéines apparaîtraient à leur tour, par suite d'une rupture de la molécule $C^nH^{2n}Az^2O^4$ en deux parties, $C^{\frac{n}{2}}H^{n+1}AzO^2$ et $C^{\frac{n}{2}}H^{n-1}AzO^2$.

Dans une autre expérience, on a chauffé à 180 degrés, pendant cent vingt heures, 1 partie d'albumine avec 3 parties de baryte. L'analyse immédiate, poussée à ses dernières limites, n'a révélé que la présence des leucines et des leucéines libres et séparables signalées plus haut; les glucoprotéines, au contraire, manquaient presque absolument (1). On conçoit, d'après cela, que dans les dédoublements avec une moindre durée de chauffe, vingt-quatre à quarante-huit heures, et à des températures moins élevées, 150-160 degrés, on puisse rencontrer simultanément des leucines, des leucéines et des termes intermédiaires ou glucoprotéines. Le mécanisme de la réaction, ainsi interprété, devient fort simple, malgré la complication apparente des faits.

La molécule albuminoïde, en perdant de l'azote et du carbone sous forme d'acides carbonique, oxalique et acétique, et d'ammoniaque, et en fixant de l'eau, se convertit en un mélange peu complexe de glucoprotéines $C^nH^{2n}Az^2O^4$, renfermant comme terme principal $C^9H^{18}Az^2O^4$, et comme terme secondaire $C^7H^{14}Az^2O^4$. Par une action prolongée de la baryte à température élevée, ces glucoprotéines se dédoublent ou se scindent en leucines et en leucéines.

Les glucoprotéines et les leucéines se rattachent aux leucines par une réaction très-nette, qui tend à établir leur véritable nature chimique.

Chauffées à 250 degrés, avec de l'hydrate de potasse fondu, additionné d'un peu d'eau, elles donnent lieu à un abondant dégagement d'hydrogène, sans mélange sensible

(1) Nous donnons plus loin les détails de cette analyse immédiate.

d'ammoniaque. Le résidu retient un peu d'acide oxalique, d'acide formique et surtout de l'acide carbonique, ainsi que des leucines moins riches en carbone.

Cette réaction peut se représenter par les équations

$$2(C^nH^{2n}AzO^2) + H^4O^2$$
$$= (C^{n-1}H^{2n-1}AzO^2 + C^nH^{2n+1}AzO^2) + CO^2 + H^4,$$
$$C^nH^{2n-1}AzO^2 + H^4O^2 = C^{n-1}H^{2n-1}AzO^2 + CO^2 + H^4.$$

On peut aussi admettre qu'il se sépare d'abord de l'acide formique qui se décompose ultérieurement en acides oxalique et carbonique:

$$2(C^nH^{2n}AzO^2) + H^4O^2$$
$$= CH^2O^2 + H^2 + C^{n-1}H^{2n-1}AzO^2 + C^nH^{2n+1}AzO^2,$$
$$C^nH^{2n-1}AzO^2 + H^4O^2 = CH^2O^2 + H^2 + C^{n-1}H^{2n-1}AzO^2.$$

Les leucéines peuvent, d'après cela, être considérées comme les acides amidés de la série acrylique ou d'une série isomère. Elles réduisent à chaud le nitrate d'argent ammoniacal. Le brome les attaque énergiquement à froid, en donnant de l'acide bromhydrique et très-probablement des acides plus oxygénés du type $C^nH^{2n-1}AzO^3$:

$$C^nH^{2n-1}AzO^2 + Br^2 + H^2O = 2BrH + C^nH^{2n-1}AzO^3.$$

Nous avons vu plus haut, par les analyses élémentaires du résidu fixe, que le rapport atomique entre l'azote et l'oxygène n'y est pas rigoureusement égal à 1:2. On a trouvé, d'une manière constante, un léger excès d'oxygène; de sorte que le rapport variait de 1:2,3 à 1:2,1. Le premier rapport correspond aux résidus fixes des conditions moyennes, dans lesquelles il ne s'élimine que 8 à 9 pour 100 d'oxalate de baryte; le second a été trouvé dans l'analyse du résidu fixe obtenu par la surchauffe à 250 degrés avec excès de baryte et élimination de 24 pour 100 d'oxalate de baryte.

Cette différence indique la présence de petites quantités soit de composés non azotés, soit de produits azotés, pour lesquels le rapport atomique de l'azote à l'oxygène est supérieur à 1 : 2.

En ce qui touche les premiers, mes analyses immédiates m'ont permis d'isoler de très-petites quantités d'acide lactique, caractérisé par sa solubilité dans l'éther et la forme cristalline du sel de zinc, ainsi que d'acide succinique. Les doses de ces deux corps sont néanmoins si faibles, qu'il est difficile de leur attribuer une influence perturbatrice sur les résultats de l'analyse. Parmi les composés azotés, le seul que nous ayons signalé jusqu'à présent avec un excès d'oxygène, la tyrosine $C^9H^{11}AzO^3$, n'entre dans le résidu fixe que dans la proportion maxima de 3,5 pour 100; on ne peut donc pas non plus le rendre seul responsable de l'excès d'oxygène.

Dans une expérience qui avait porté sur 1 kilogramme d'albumine, chauffée pendant quatre-vingt-seize heures avec trois fois son poids de baryte à 180 degrés, j'ai pu extraire du mélange amidé quelques grammes d'un acide cristallisable, offrant une composition voisine de celle de l'acide glutamique $C^5H^9AzO^4$, ainsi que d'un second acide, également cristallisable, dont la composition serait celle de l'acide glutamique moins une molécule d'eau, $C^5H^7AzO^3$, acide auquel j'ai donné le nom d'*acide glutimique*.

Voici dans quelles circonstances j'ai pu isoler ces deux corps :

La solution barytique provenant de l'autoclave a été filtrée et bouillie pour chasser l'ammoniaque, puis précipitée par un courant d'acide carbonique. Elle retenait alors une certaine quantité de baryte non précipitable par l'acide carbonique et dont le poids correspond généralement, dans ces sortes d'opérations, à 22^{gr} de sulfate de baryte pour 100 d'albumine. La liqueur a été évaporée à sec dans le vide, sans élimination préalable de cette baryte, et le résidu

épuisé par l'alcool à 90 pour 100 bouillant. Il reste, dans ce cas, une masse emplastique formée d'un sel barytique soluble dans l'eau, insoluble dans l'alcool. Cette masse, dissoute dans l'eau, a été précipitée par le nitrate mercurique, d'abord sans neutralisation de la liqueur, puis en neutralisant le liquide filtré par du carbonate de soude, comme on le fait dans le dosage de l'urée par le procédé Liebig.

Les deux précipités, bien lavés à l'eau bouillante, ont été délayés dans l'eau chaude et décomposés par l'hydrogène sulfuré.

Les solutions, décolorées par du noir animal purifié et concentrées, ont déposé des cristaux que l'on a purifiés par de nouvelles cristallisations dans l'eau et l'alcool.

Le précipité, obtenu sans addition de carbonate de soude, a donné 4 grammes environ d'un corps acide cristallisé en beaux et volumineux prismes brillants, de 1 à 2 millimètres d'épaisseur sur 5 à 6 millimètres de long, d'un éclat presque adamantin, fusibles vers 180 degrés, d'une saveur acide, peu solubles dans l'eau froide, insolubles dans l'alcool froid. L'analyse de ces cristaux a donné les nombres suivants :

(a_1)	Matière	0,212
	Acide carbonique	0,3605
	Eau	0,1095
(a_2)	Matière	0,282
	Acide carbonique	0,489
	Eau	0,143
(a_3)	Matière	0,233
	Volume d'azote mesuré	$22^{cc},8$
	H	757^{mm}
	T	19°
	Volume calculé	$20^{cc},7$

En centièmes, on a :

	a_1.	a_2.	a_3.	$C^5H^7AzO^3$.
Carbone.....	46,37	47,2	»	46,51
Hydrogène...	5,73	5,63	»	5,42
Azote........	»	»	11,16	10,80
Oxygène.....	»	»	»	37,27

La capacité de saturation de cet acide a été déterminée en en dissolvant un poids connu dans l'eau, colorant la liqueur avec un peu de tournesol sensible, et en cherchant le volume de soude normale à $\frac{1}{10}$ d'équivalent par litre nécessaire pour ramener au bleu. 0,2665 de matière ont exigé $19^{cc},3$ de soude normale à $\frac{1}{10}$ d'équivalent. En admettant que le poids moléculaire $C^5H^7AzO^3$ sature 1 équivalent de soude, on aurait dû employer $20^{cc},6$. L'acide glutimique est donc monobasique.

Les cristaux retirés du second précipité mercurique, formé après neutralisation partielle par le carbonate de soude, étaient beaucoup moins nets que les premiers. Ils se présentaient sous forme de grains mamelonnés, opaques, blancs, à saveur acide et composés d'aiguilles groupées autour d'un centre. Leur point de fusion est dans le voisinage de 150 degrés.

L'analyse élémentaire a donné les résultats suivants :

(a_1)	Matière......................	0,2555
	Acide carbonique..............	0,371
	Eau.........................	0,1425
(a_2)	Matière......................	0,278
	Acide carbonique..............	0,406
	Eau.........................	0,1535
(a_3)	Matière......................	0,2285
	Acide sulfurique normal à 1 équivalent (49 grammes) par litre, saturé par l'ammoniaque dégagée sous l'influence de la chaux sodée....	$1^{cc},7$

Ces nombres, traduits en centièmes, conduisent à la formule de l'acide glutamique, ou plutôt d'un mélange d'acide glutamique avec $\frac{1}{4}$ environ de son poids d'acide aspartique :

	a_1.	a_2.	a_3.	$C^5H^9AzO^4$.	$(3C^5H^9AzO^4 + C^4H^7AzO^4)$.
rbone...	39,5	39,83	»	40,8	39,6
drogène.	6,19	6,13	»	6,1	5,9
ote......	»	»	10,4	9,5	9,75
ygène...	»		»	»	»

La capacité de saturation de cet acide a été déterminée par l'analyse du sel d'argent obtenu en neutralisant par du carbonate d'argent. Le sel d'argent est blanc, cristallin et très-peu soluble dans l'eau froide.

(a_1)	Matière........................	0,326
	Argent........................	0,138

En centièmes, on a :

	a_1.	$C^5H^8AgAzO^4$.
Argent............	42,33	42,5

Le sel d'argent obtenu par l'oxyde d'argent se présente sous forme d'une masse blanche, amorphe, très-sensible à la lumière.

(b_1)	Matière......................	0,327
	Argent	1,88

En centièmes, on a :

	b_1.	$C^5H^7Ag^2AzO^4$.
Argent..................	57,5	59,8

Cet acide serait donc bibasique et susceptible de former un sel d'argent acide, indécomposable par l'acide carbonique, et un sel neutre décomposable. D'après son apparence et son point de fusion, il ne serait pas identique avec l'acide glutamique de Ritthausen.

Dans une autre expérience, le hasard m'a conduit à isoler une petite quantité d'un acide cristallisé en grains brillants et dont l'analyse concorde avec les nombres exigés par l'acide glutamique.

(a_1)	Matière	0,304
	Acide carbonique	0,4545
	Eau	0,174
(a_2)	Matière	0,308
	Volume d'azote mesuré	$27^{cc},6$
	H	747^{mm}
	T	18°
	Volume calculé	$24^{cc},9$

En centièmes, on a :

	a_1.	a_2.	$C^6H^9AzO^4$.
Carbone	40,77	»	40,81
Hydrogène	6,34	»	6,12
Azote	»	10,15	9,52
Oxygène	»	»	»

Par leur masse, les acides glutimique et glutamique ne jouent qu'un rôle très-secondaire dans la constitution du mélange résultant de la décomposition de l'albumine. Dans beaucoup de cas, il m'a été impossible de les déceler et de les isoler avec certitude, soit que toutes les variétés d'albumine ne puissent en donner, soit que, suivant les conditions de l'expérience, ils se forment ou non aux dépens de la molécule complexe.

Dans la plupart des cas, les acides que j'ai pu retirer du sel barytique insoluble dans l'alcool n'offraient pas une composition constante d'une expérience à l'autre. Ils paraissent être des résidus d'une décomposition plus ou moins avancée, susceptibles de se résoudre en leucines et en acide oxalique lorsque l'on insiste sur l'action de la baryte.

Ainsi, dans une expérience faite avec 1 partie d'albumine et 6 parties d'hydrate de baryte, chauffées à 180 de-

grés pendant quarante-huit heures, le sel barytique insoluble dans l'alcool à 90 pour 100 a été dissous dans l'eau, exactement précipité par l'acide sulfurique. Le liquide a été filtré, évaporé à sec dans le vide, et le résidu a été bouilli avec de l'alcool. Il est resté une portion non dissoute. La solution a été distillée à sec et le résidu repris par l'eau; enfin, cette solution concentrée a donné : 1° une cristallisation en grains; 2° une eau mère qui s'évapore sous forme d'une masse incristallisable.

Les cristaux en grains ont donné :

(a_1)	Matière	0,272
	Acide carbonique	0,503
	Eau	0,207
(a_2)	Matière	0,284
	Volume d'azote mesuré	$26^{cc},5$
	H	$748^{mm},5$
	T	11°
	Volume calculé	$24^{cc},7$

En centièmes, on trouve des nombres qui correspondent à la formule $C^{11}H^{22}Az^2O^5$:

	a_1.	a_2.	$C^{11}H^{22}Az^2O^5$.
Carbone	50,43	»	50,38
Hydrogène	8,45	»	8,39
Azote	»	10,9	10,68
Oxygène	»	»	»

J'ai eu plusieurs fois l'occasion d'isoler, toujours en petites quantités, des cristallisations dont l'analyse conduisait au type $C^nH^{2n}Az^2O^5$; nous y reviendrons plus loin.

La matière amorphe, acide, soluble dans l'alcool, séchée à 120 degrés, se présente sous forme d'une masse cassante, fusible au-dessous de 100 degrés.

Elle a donné, à l'analyse :

(a_1)	Matière	0,322
	Acide carbonique	0,568
	Eau	0,191
(a_2)	Matière	0,360
	Volume d'azote mesuré	$31^{cc},5$
	H	755^{mm}
	T	11°
	Volume calculé	$29^{cc},6$

Ces nombres, calculés en centièmes, conduisent à la formule $C^{11}H^{18}Az^2O^6$:

	a_1.	a_2.	$C^{11}H^{18}Az^2O^6$.
Carbone	48,1	»	48,1
Hydrogène	6,59	»	6,57
Azote	»	10,3	10,2
Oxygène	»	»	»

Il était resté, après le traitement à l'alcool, un résidu insoluble, très-acide, qui a donné les résultats suivants :

(a_1)	Matière	0,3585
	Acide carbonique	0,5945
	Eau	0,195

nombres qui, traduits en centièmes, conduiraient à la formule $C^{10}H^{16}Az^2O^6$, homologue de la précédente :

	a_1.	$C^{10}H^{16}Az^2O^6$.
Carbone	45,22	46,1
Hydrogène	6,04	6,1
Azote	»	»

Cet acide, saturé par le carbonate d'argent, a donné un sel d'argent cristallisable, en grains, dont voici l'analyse :

(a_1)	Matière	0,376
	Acide carbonique	0,350
	Eau	0,097

(a_2)	Matière	0,439
	Argent	0,1905
(a_3)	Matière	0,368
	Argent	0,162
(a_4)	Matière	0,338
	Volume d'azote mesuré	17^{cc}
	H	770^{mm}
	T	7°
	Volume corrigé	$16^{cc},6$

nombres qui, calculés en centièmes, conduisent à la formule $C^{10}H^{14}Ag^2Az^2O^6$:

	a_1.	a_2.	a_3.	a_4.	$C^{10}H^{14}Ag^2Az^2O^6$.
Carbone...	25,38	»	»	»	25,31
Hydrogène.	2,86	»	»	»	2,9
Argent....	»	43,3	44,0	»	45,5
Azote.....	»	»	»	6,1	5,9

Ces acides, qui appartiennent au type $C^nH^{2n-4}Az^2O^6$, semblent être des résidus d'une décomposition incomplète et les générateurs de l'acide oxalique que nous avons vu apparaître en proportions bien plus fortes en insistant sur l'action de la baryte. En effet, chauffés avec de la potasse fondante, ils se décomposent, sans dégagement d'hydrogène, en acide oxalique et en leucines.

On a

$$C^{10}H^{16}Az^2O^6 + H^4O^2 = C^2H^2O^4 + 2C^4H^9AzO^2.$$

Les analyses suivantes semblent aussi démontrer l'existence de termes acides appartenant au type $C^nH^{2n-1}AzO^8$, avec une valeur de n intermédiaire entre 4 et 5.

Le sel barytique insoluble dans l'alcool, obtenu dans une opération à conditions moyennes, bien épuisé par l'alcool bouillant, a été dissous dans l'eau; la baryte a été précipitée par l'acide sulfurique et la solution acide neutralisée par le carbonate de zinc. Par l'évaporation au bain-

marie, on a obtenu un sel gommeux incristallisable, qui a fourni les nombres suivants :

(a_1)	Matière	1,236
	Acide carbonique	1,5585
	Eau	0,5095
(a_2)	Matière	1,2805
	Oxyde de zinc	0,360
(a^3)	Matière	1,4035
	Volume d'azote mesuré	102cc
	H	757mm
	T	13°
	Volume corrigé	95cc,5

Ces nombres, calculés en centièmes, conduisent très-près de la formule $C^9H^{14}Zn^2Az^2O^6$ (Zn = 32) :

	a_1.	a_2.	a_3.	$C^9H^{14}Zn^2Az^2O^6$.
Carbone	34,3	»	»	34,8
Hydrogène	4,5	»	»	4,5
Zinc	»	22,4	»	20,6
Azote	»	»	8,54	9,0
Oxygène	»	»	»	20,6

Un acide cristallisé en aiguilles très-solubles, isolé d'un précipité mercuriel formé en ajoutant du nitrate de mercure à la solution d'un sel barytique insoluble dans l'alcool, a donné :

(a_1)	Matière	0,3485
	Acide carbonique	0,545
	Eau	0,207
(a_2)	Matière	0,6325
	Acide sulfurique à un équivalent par litre (49 grammes), saturé par l'ammoniaque dégagée sous l'influence de la chaux sodée	5cc

Ces nombres, traduits en centièmes, conduisent très-près de la formule $C^9H^{16}Az^2O^6$:

	a_1.	a_2.	$C^9H^{16}Az^2O^6$.
Carbone........	42,65	»	43,5
Hydrogène.....	6,59	»	6,4
Azote.........	»	11,2	11,3
Oxygène.......	»	»	»

Nous avons trouvé plus haut un corps cristallisé dont la formule serait $C^{11}H^{22}Az^2O^5$.

Les corps de ce type $C^nH^{2n}Az^2O^5$ peuvent être envisagés comme des combinaisons de leucines $C^nH^{2n+1}AzO^2$ avec un acide du type $C^nH^{2n-1}AzO^3$, du genre de celui que je viens de signaler. Voici d'autres analyses de cristaux du type $C^nH^{2n}Az^2O^5$. La solution aqueuse du sel barytique insoluble dans l'alcool a été précipitée exactement par l'acide sulfurique ; le liquide filtré, évaporé à sec, a laissé un résidu que l'on a repris par l'alcool bouillant ; la solution concentrée a déposé des cristaux qui ont donné à l'analyse :

(a_1)	Matière......................	0,246
	Acide carbonique.............	0,401
	Eau..........................	0,154
(a_2)	Matière......................	0,410
	Acide sulfurique normal à un équivalent (49gr) par litre saturé par l'ammoniaque dégagée sous l'influence de la chaux sodée.....	3cc,7

Ces nombres conduisent très-près de la formule

$$C^8H^{16}Az^2O^5.$$

	a_1.	a_2.	$C^8H^{16}Az^2O^5$.
Carbone...........	44,4	»	43,6
Hydrogène.......	6,95	»	7,2
Azote.............	»	12,6	12,7
Oxygène...........	»	»	36,5

Un autre dépôt cristallin, obtenu dans des conditions analogues, a donné :

(a_1)	Matière	0,3555
	Acide carbonique	0,5905
	Eau	0,250
(a_2)	Matière	0,599
	Volume d'azote mesuré	61^{cc}
	H	762^{mm}
	T	13°
	Volume corrigé	$57^{cc},5$

Ces nombres conduisent à la formule $C^9H^{18}Az^2O^5$.

	a_1.	a_2.	$C^9H^{18}Az^2O^5$.
Carbone	45,3	»	46,15
Hydrogène	7,81	»	7,69
Azote	»	12,0	11,96
Oxygène	»	»	34,20

En résumé, les composés contenus dans le résidu fixe et dont la présence modifie légèrement le rapport atomique 1 : 2 entre l'azote et l'oxygène sont :

1° Des traces de composés non azotés, acides lactique et succinique ;

2° La tyrosine $C^9H^{11}AzO^3$, 3,5 pour 100 ;

3° Des acides amidés du type $C^nH^{2n-1}AzO^4$ (acides glutamique et aspartique) ;

4° Des acides amidés du type $C^nH^{n-3}AzO^3$ (acide glutimique $C^5H^7AzO^3$) ;

5° Des acides amidés du type $C^mH^{2m-4}Az^2O^6$;

6° Des acides amidés du type $C^nH^{2n-1}AzO^3$;

7° Des composés intermédiaires du type $C^mH^{2m}Az^2O^5$.

Ces divers produits ne se rencontrent qu'en faibles proportions.

§ X. — *Discussion des résultats.*

Il importe maintenant de discuter et d'interpréter les nombreux résultats consignés dans la première Partie de ce Mémoire.

Nous envisagerons d'abord le résidu fixe comme un composé unique et nous chercherons à établir l'équation qui le relie à l'albumine, avec les autres produits isolés dans la réaction.

En second lieu, nous tirerons de la composition immédiate de ce résidu fixe les conséquences naturelles qui en découlent.

1. *Équation de la réaction, le résidu fixe étant considéré dans son ensemble comme un principe unique.* — Les données fondamentales sur lesquelles j'appuie l'équation de réaction ont été établies avec assez de soin et contrôlées un assez grand nombre de fois, pour qu'il me soit permis de formuler cette réaction en toute confiance, malgré sa complication, plus apparente que réelle.

Nous devons, avant tout, être fixés sur la formule de l'albumine qu'il convient d'adopter, car c'est sur elle que repose tout l'édifice.

La formule de Lieberkühn, $C^{72}H^{112}Az^{18}O^{22}S$, ne peut plus être conservée, puisqu'elle répond à un dosage d'azote inexact et trop faible, 15,8 pour 100 au lieu de 16,5; mais, même en la modifiant d'après cette nouvelle donnée, de manière à conserver un poids moléculaire à peu près semblable, il est impossible d'arriver avec elle à une équation contenant tous les termes du dédoublement avec un minimum d'au moins 1 molécule. Ainsi, l'un des principes les plus constants, celui qui se prête le mieux au dosage, en raison de son peu de solubilité et de la facilité avec laquelle il cristallise, la tyrosine, n'a jamais dépassé 3,5 pour 100 d'albumine. Comme il est peu probable que plusieurs molécules d'albumine puissent concourir à la

formation d'une molécule de tyrosine, on est amené par cela seul à donner à l'albumine un poids moléculaire voisin de 5500, puisque $\frac{181}{5500} = 3,3$.

Une expression de la forme $C^{240}H^{387}Az^{65}O^{75}S^{3}$, correspondant à un poids moléculaire égal à 5473, satisfait aux conditions imposées par les doses de soufre et de tyrosine, ainsi qu'aux résultats de l'analyse élémentaire.

On a en effet :

	Théorie.	Expérience.
Carbone	52,62	52,57
Hydrogène	7,07	7,16
Azote..............	16,62	16,6
Oxygène...........	21,94	21,8
Soufre.............	1,75	1,8
Poids moléculaire....	5473	

Il importe du reste peu, pour le moment, de décider si cette formule représente ou non le véritable poids moléculaire de l'albumine. Telle qu'elle est, elle doit pouvoir servir à formuler la décomposition de ce corps, en tenant compte des données numériques des paragraphes précédents.

Si nous prenons comme base de calcul les nombres fournis par les expériences nos 6, 9 et 11 faites avec 5 ou 6 parties de baryte à 180 degrés, expériences dans lesquelles on a trouvé :

	Pour 100.
Azote ammoniacal...............	4,03
Oxalate de baryte	17,6
Carbonate de baryte............	11,0
Acide acétique................	4,6-4,9

On voit que ces nombres correspondent très-approximativement, pour 1 molécule ou 5473 d'albumine, à :

	Molécules.
Ammoniaque..................	16
Acide oxalique.................	4

	Molécules.
Acide acétique..............	4
» carbonique...........	3

onduit à l'équation

$$^{140}H^{387}Az^{65}O^{75}S^{3} + 60\,H^{2}O$$
$$= 16\,AzH^{3} + 4\,(C^{2}H^{2}O^{4}) + 3\,CO^{2} + 4\,(C^{2}H^{4}O^{2})$$
$$+ C^{221}H^{435}Az^{49}O^{105} + S^{3}.$$

cette équation, le poids du résidu fixe, pour 100 ine, serait 99,6, et il renfermerait pour 100 :

Carbone.................	48,63
Hydrogène........... .	7,97
Azote........	12,58
Oxygène................	»

ıombres concordent avec ceux fournis par l'expé- Le résidu fixe, moins une molécule de tyrosine ou $^{\prime}Az^{48}O^{102}$, se rapproche très-sensiblement d'une on de la forme $C^{n}H^{2n}Az^{2}O^{4}$ et n'en diffère que par ' excès d'oxygène.

les résultats des expériences extrêmes poussées jus- ıo degrés, l'équation est, à peu de chose près, la Nous avions trouvé :

Azote ammoniacal.........	4,4
Carbonate de baryte........	11,5
Oxalate de baryte..	24 à 26
Acide acétique............	5,4

ır 1 molécule ou 5473 d'albumine :

	Molécules.
Ammoniaque...............	17
Acide oxalique.............	6
» carbonique...........	3
» acétique.............	5

ce qui conduit à l'équation :

$$C^{240}H^{387}Az^{65}O^{75}S^{4} + 62H^2O$$
$$= 17AzH^3 + 6(C^2H^2O^4) + 5(C^2H^4O^2)$$
$$+ 3CO^2 + S^3 + C^{215}H^{428}Az^{48}O^{97}.$$

Le poids du résidu fixe calculé pour 100 d'albumine, d'après cette équation, est égal à 95,6 ; on a trouvé 95,8.

L'expression $C^{215}H^{428}Az^{48}O^{97}$ exige :

Carbone.	49,31
Hydrogène.	8,18
Azote.	12,84

On a trouvé :

Carbone.	48,5
Hydrogène.	8,1
Azote.	12,8-13,0

Dans les deux cas, l'accord entre la théorie et l'expérience est donc satisfaisant, et l'on est certain qu'aucun terme essentiel n'a échappé aux investigations.

En retranchant du résidu fixe $C^{215}H^{428}Az^{48}O^{97}$ une molécule de tyrosine correspondant à 3,2 pour 100 d'albumine, le reste $C^{206}H^{417}Az^{48}O^{94}$ est, à peu de chose près, de la forme $C^nH^{2n}Az^2O^4$.

Il est inutile d'insister sur les équations correspondant à des actions plus ménagées et incomplètes.

Cependant les expériences faites à 100-110 degrés, avec 2 parties de baryte, ont donné des résultats qui méritent d'être interprétés.

On a trouvé pour 100 d'albumine :

Azote ammoniacal.	2,0
Carbonate de baryte.	4,0
Oxalate de baryte.	5,0
Acide acétique.	2,1

et par conséquent, pour 1 molécule d'albumine :

	Molécules.
Ammoniaque..........	8
Acide carbonique...........	1
» oxalique.............	1
» acétique..............	2

En tenant compte de l'analyse du résidu fixe obtenu dans ces conditions, analyse qui a donné :

Carbone....................	51,2
Hydrogène.................	7,29
Azote......................	13,8

on peut poser l'équation

$$C^{240}H^{387}Az^{65}O^{75}S^{3} + 28H^{2}O$$
$$= 8AzH^{3} + C^{2}H^{2}O^{4} + 2(C^{2}H^{4}O^{2}) + CO^{2} + C^{233}H^{409}Az^{57}O^{93} + S^{3}.$$

Dans ces conditions, l'hydratation est poussée moins loin que précédemment; il ne se fixe que la moitié de l'eau correspondant à une réaction complète, et le résidu fixe se rapproche sensiblement d'une expression de la forme $C^{n}H^{2n-2}Az^{2}O^{3}$.

Quelles que soient les hypothèses que l'on fasse sur l'origine de l'ammoniaque et des acides carbonique, oxalique et acétique, on est conduit à admettre qu'ils proviennent de l'hydratation de certains groupements engagés dans la molécule de l'albumine et que, pendant l'hydratation, il se fixe autant de molécules d'eau qu'il y a de molécules d'ammoniaque devenues libres. Si donc de la formule de l'albumine nous retranchons l'ammoniaque et les acides carbonique, oxalique, acétique, dans les proportions fournies par l'expérience pour 1 molécule d'albumine, moins un nombre de molécules d'eau égal au nombre de molécules d'ammoniaque (la décomposition de l'urée n'exigeant que la fixation de 1 molécule d'eau pour 2 molécules d'am-

moniaque, il conviendra d'ajouter à la différence précédente $3H^2O$); en d'autres termes, si de $C^{240}H^{387}Az^{75}O^{25}S^3$ nous retranchons le polynôme

$$[16AzH^3 + 4(C^2H^2O^4) + 3CO^2 + 4(C^2H^4O^2) + S^3 - 16H^2O + 3H^2O],$$

le reste $C^{221}H^{341}Az^{49}O^{58}$ se rapproche d'une expression de la forme $C^nH^{2n-2}AzO$ au même degré que le résidu fixe $C^{221}H^{435}Az^{49}O^{105}$ se rapproche d'une expression de la forme $C^nH^{2n}AzO^2$; les différences résident, de part et d'autre, dans un petit excès d'oxygène, qui est à peu près le même.

Il résulte de là que, abstraction faite du ou des groupements qui fournissent l'ammoniaque libre et les acides oxalique, carbonique et acétique, la molécule d'albumine se rapproche d'un corps de formule $x(C^mH^{2m-4}Az^2O^2)$ et subit l'hydratation en deux temps distincts. A 100 degrés, avec une proportion limitée de baryte, ce groupement fixe un nombre de molécules d'eau égal à la moitié du nombre d'atomes d'azote qu'il renferme, et devient

$$x(C^mH^{2m-2}Az^2O^3).$$

Celui-ci peut à son tour fixer, lorsqu'on le chauffe avec de la baryte vers 150 degrés, un nombre de molécules d'eau égal à la moitié du nombre d'atomes d'azote qu'il renferme, ce qui le change en $x(C^mH^{2m}Az^2O^4)$. Le résultat final est donc la fixation d'autant de molécules d'eau que l'albumine contient d'atomes d'azote. L'albumine est donc un composé imidé que l'hydratation change en un mélange de corps amidés.

L'excès d'oxygène qui se retrouve dans le groupement imidé et le groupement amidé, et qui modifie un peu les rapports simples AzO et AzO^2, est dû à la présence des composés plus riches en oxygène, signalés plus haut. A première vue, il est manifeste qu'il y a une certaine cor-

rélation entre les doses d'azote ammoniacal et celles de l'acide carbonique et de l'acide oxalique. Pour arriver à mieux préciser ce rapport, nous devons tenir compte des résultats obtenus dans diverses conditions expérimentales.

A 250 degrés, avec un excès de baryte, nous avons trouvé 17 à 18 molécules d'ammoniaque pour 3 molécules d'acide carbonique et 6 molécules d'acide oxalique. A chaque molécule d'acide correspondent, par conséquent, 2 molécules d'ammoniaque. Les choses se passent comme s'il y avait décomposition de l'urée ou de la cyanamide et de l'oxamide. On a, en effet,

$$CH^4Az^2O + H^2O = CO^2 + 2AzH^3,$$
$$C^2H^4Az^2O^2 + 2H^2O = C^2H^2O^4 + 2AzH^3.$$

Une semblable relation pourrait n'être que fortuite. Elle acquiert cependant un grand degré de probabilité si l'on tient compte qu'elle se vérifie pour la grande majorité des matières azotées de l'organisme.

Ainsi, pour la laine chauffée pendant vingt-quatre heures à 200 degrés avec 6 parties de baryte cristallisée, on a trouvé :

Azote ammoniacal.........	5,3
Carbonate de baryte.......	20,3
Oxalate de baryte.	20,4
Azote calculé d'après les relations précédentes.......	5,3

Les cheveux humains, dégraissés à la benzine et chauffés à 180 degrés pendant cent heures, avec 3 parties de baryte cristallisée, ont donné :

Azote ammoniacal.........	5,14
Carbonate de baryte.... ..	19,8
Oxalate de baryte........	19,4
Azote calculé d'après les relations.................	5,1

L'osséine a donné dans les mêmes conditions :

Azote ammoniacal	3,35
Carbonate de baryte	14,02
Oxalate de baryte	9,8
Azote calculé	3,15

L'ichthyocolle a donné :

Azote ammoniacal	3,4
Carbonate de baryte	13,24
Oxalate de baryte	11,3
Azote calculé	3,22

La gélatine a donné :

Azote ammoniacal	2,8
Carbonate de baryte	12,2
Oxalate de baryte	8,9
Azote calculé	2,79

Les poils de chèvre (alpaga) ont donné :

Azote ammoniacal	2,55
Carbonate de baryte	7,6
Oxalate de baryte	12,7
Azote calculé	2,59

La soie brute des cocons verts du Japon a donné :

Azote ammoniacal	3,10
Carbonate de baryte	9,0
Oxalate de baryte	16,4
Azote calculé	3,2

La fibroïne décreusée au savon bouillant et à l'acid acétique a donné :

Azote ammoniacal	2,0
Carbonate de baryte	9,0
Oxalate de baryte	8,1
Azote calculé	2,2

La chondrine des cartilages a donné :

Azote ammoniacal.........	2,88
Carbonate de baryte......	11,00
Oxalate de baryte........	11,4
Azote calculé.............	2,87

Le gluten seul semble constituer une exception à cet accord. En effet, on a trouvé pour la fibrine végétale, ou gluten débouilli à l'alcool :

Azote ammoniacal........	4,62
Carbonate de baryte.......	5,2
Oxalate de baryte.........	7,5
Azote calculé.............	1,63

Mais on sait que le gluten fournit des produits spéciaux, et notamment de l'acide glutamique. L'excès d'azote ammoniacal peut provenir du dédoublement d'un amide particulier, analogue à l'asparagine. Il est à remarquer que cet excès d'azote ammoniacal, 3 pour 100, se dégage très-facilement dès le début de l'ébullition avec la baryte, comme l'a déjà observé Nasse.

Les nombres précédents prouvent de plus qu'il n'y a pas de relation constante entre les doses d'acides carbonique et oxalique. Les poids du carbonate de baryte sont tantôt notablement inférieurs, tantôt supérieurs à ceux de l'oxalate.

Au point de vue de la séparation, il y a également indépendance. Ainsi, avec l'albumine, en chauffant à 120 degrés avec 2,5 à 3 parties de baryte, on arrive à isoler la quantité maxima d'acide carbonique, alors que l'acide oxalique n'apparaît encore qu'à très-faibles doses.

L'acide oxalique ne se sépare complétement que sous l'influence d'un excès de baryte et à une température élevée. On peut atteindre la dose limite d'azote ammoniacal sans isoler plus du tiers de l'acide oxalique corres-

pondant. C'est ce qui arrive à 150 degrés, avec 3 parties de baryte, conditions dans lesquelles on trouve :

Azote ammoniacal	4,06	(limite)
Carbonate de baryte	10,5	»
Oxalate de baryte	8,5	à 9,0
Azote calculé	2,56	

Des phénomènes analogues s'observent avec les substances voisines de l'albumine, telles que la caséine, la fibrine, la sérine. Il est probable que le groupement oxamide contenu dans la molécule d'albumine se scinde en ammoniaque et acide oxalique ; mais ce dernier, au lieu de se séparer, resterait uni, copulé à des composés azotés du résidu fixe, et ne se séparerait que sous l'influence d'une action plus énergique. Nous avons trouvé, en effet, dans le résidu fixe, des corps acides qui représentent de semblables combinaisons : tels sont les acides $C^{11}H^{18}Az^2O^6$, $C^{10}H^{16}Az^2O^6$. L'acide dont la composition se rapproche de celle de l'acide glutamique, mais qui n'en possède pas les caractères physiques, pourrait être considéré comme un terme du même genre, et les analyses interprétées rigoureusement conduiraient plutôt pour lui à la formule $C^9H^{16}Az^2O^7$, corps qui, en se décomposant, donnerait $C^9H^{16}Az^2O^7 + H^2O = C^2H^2O^4 + C^7H^{16}Az^2O^4$. On comprend ainsi comment, au début et à 100 degrés, la dose d'azote ammoniacal peut dépasser de 1 à 1,5 pour 100 celle qui correspond aux acides carbonique et oxalique isolés en même temps.

Il semble aussi exister une relation entre les doses d'acide oxalique et d'acide acétique, qui sont presque équivalentes dans la plupart des cas, et pour la plupart des matières protéiques examinées.

Généralement, l'acide acétique est un peu faible pour vérifier exactement ce rapport, ce qui peut tenir au mode d'analyse qui ne serait pas rigoureux, le résidu fixe re—

tenant un peu d'acide acétique. Pour une même substance, telle que l'albumine, on voit les deux acides augmenter simultanément, à mesure que l'on fait intervenir des conditions plus énergiques.

Si l'expérience vient confirmer dans la suite, pour d'autres matières protéiques, une relation simple entre les doses d'acides acétique et oxalique, au lieu du groupement oxalique, on aurait un groupement analogue à la tartramide

$$C^4H^8Az^2O^4 + 2H^2O = C^2H^2O^4 + C^2H^4O^2 + 2AzH^3.$$

Il est aussi possible que l'apparition de l'acide acétique et celle d'une partie de l'acide carbonique soient liées à la décomposition d'une amide malonique

$$C^3H^6Az^2O^2 + H^4O^2 = CO^2 + 2AzH^3 + C^2H^4O^2.$$

Tant que l'on n'aura pas isolé les groupements générateurs, on ne pourra faire que des hypothèses plus ou moins plausibles sur leur nature.

Celles que nous avons proposées satisfont à la relation générale

$$A^{CO^2} + B^{C^2H^2O^4} = \frac{M^{AzH^3}}{2}, \quad M = 2(A + B).$$

Peut-être convient-il de rappeler que, d'après mes expériences sur l'altération de la levûre, et celles du Dr Salomon sur la putréfaction de l'albumine, il se forme de la xanthine et de l'hypoxanthine. Ces corps ne se retrouvent pas parmi les produits du dédoublement de la matière protéique sous l'influence de la baryte. L'origine de l'ammoniaque libre et des trois acides non azotés est peut-être liée à la décomposition d'un groupement de cet ordre.

Voici, à titre de renseignements, les doses d'acide acétique trouvées avec diverses matières protéiques :

Albumine coagulée	(150° — 3 part. de baryte)....	3,4
»	(250° — 6 »)...	4,2
»	(250° — 6 »)....	5,1
Caséine	(150° — 3 »)....	3,36
Fibrine du sang	» » ..	3,6
Sérine	» » ...	3,48
Fibrine végétale	» »	2,00
Osséine	» » ...	1,44
Ichthyocolle	» »	1,3
Chondrine	» » ...	4,7
Fibroïne	» »	2,0
Poils de chèvre	» »	2,1
Cheveux	» »	4,2
Laine	» »	3,12

RÉSUMÉ.

En résumé, il découle de l'ensemble de ces recherches et des documents consignés dans ce Mémoire :

1° Que le mélange des principes fixes dérivés de l'albumine par hydratation ne contient que des corps amidés;

2° Qu'on peut le partager en deux portions inégales :

(*a*) L'une, dont le poids est de 16 à 18 pour 100 environ, renferme des substances pour lesquelles le rapport atomique de l'azote à l'oxygène est de 1 : 3, ou de 1 : 4, ou de 2 : 5; la fraction la plus importante de cette première portion est constituée par des acides amidés de formules $C^nH^{2n-1}AzO^4$, $C^nH^{2n-3}AzO^8$, $C^{2n}H^{4n-4}Az^2O^6$ et $C^nH^{2n-1}AzO^3$. Le terme intermédiaire peut n'être qu'une combinaison moléculaire des termes $C^nH^{2n-3}AzO^3$ et de $C^nH^{2n-1}AzO^8$. La dose de baryte non précipitable par l'acide carbonique fixe en équivalents de base la quantité de ces divers acides ou leur capacité de saturation. On a trouvé d'une manière constante 22 grammes de sul-

fate de baryte pour 100 d'albumine, soit 10 équivalents de baryte, dont 4 correspondent à l'acide acétique et 6 aux acides amidés fixes, pour 1 molécule d'albumine; en prenant comme terme moyen de ces acides $C^9H^{14}Az^2O^6$, la quantité de baryte saturée indique la présence de 3 molécules de ce corps ou de 13,5 pour 100.

(*b*). L'autre partie, qui forme plus des $\frac{4}{5}$ du résidu fixe, peut être représentée par la formule $x(C^nH^{2n}Az^2O^4)$, avec une valeur de n un peu inférieure à 9.

Suivant que l'action de la baryte a été plus ou moins prolongée ou énergique, cette portion est ou un mélange de glucoprotéines $x(C^nH^{2n}Az^2O^4)$ seulement, ou un mélange de glucoprotéines $x(C^nH^{2n}Az^2O^4)$, de leucines $(C^nH^{n+1}AzO^2)$ et de leucéines $(C^nH^{2n-1}AzO^2)$, ou enfin un mélange de leucines et de leucéines seulement.

Si nous nous en tenons aux grandes lignes du phénomène, nous voyons qu'en retranchant de la molécule d'albumine $C^{240}H^{387}Az^{68}O^{75}S^3$ le polynôme

$$[16AzH^3 + 3CO^2 + 5C^2H^4O^2 + 5C^2H^2O^4 + S^3 - (16H^2O - 3H^2O)],$$

qui correspond aux expériences faites dans les conditions les plus énergiques, ainsi que 1 molécule de tyrosine $C^9H^{11}AzO^3$, le reste $C^{208}H^{324}Az^{48}O^{49}$ est sensiblement de la forme $24(C^nH^{2n-2}Az^2O^2)$. Ce groupement, en fixant 48 molécules d'eau, se convertit en $24(C^nH^{2n}Az^2O^4)$. Si à ces 48 molécules nous ajoutons les 13 molécules qui ont dû se fixer pour former l'ammoniaque libre et les trois acides non azotés, nous retrouvons les 62 molécules qui figurent dans l'équation générale.

Dans les expériences à température peu élevée, 100 à 120 degrés, nous avons surtout rencontré des corps appartenant aux deux types $x(C^9H^{18}Az^2O^4)$, $y(C^7H^{14}Az^2O^4)$.

La formule $C^{208}H^{320}Az^{48}O^{48}$ (légère modification de la

précédente) peut se décomposer en

$$4(C^7H^{14}Az^2O^4) + 20(C^9H^{18}Az^2O^4)$$

ou en

$$C^{28}H^{56}Az^8O^{16} + 5(C^{36}H^{72}Az^8O^{16})$$

ou en

$$2(C^{14}H^{28}Az^4O^8) + 10(C^{18}H^{36}Az^4O^8).$$

Les termes entre parenthèses représenteraient les *termes primordiaux* de l'hydratation de l'albumine : ce sont les glucoprotéines, dont le véritable poids moléculaire n'est pas encore fixé et dont la décomposition ultérieure donne naissance aux leucines et aux leucéines, et très-probablement aussi à des glucoprotéines moins complexes. On conçoit, en effet, qu'un corps dont la formule serait

$$C^{18}H^{36}Az^4O^8$$

puisse se scinder en deux termes ayant pour formules soit $C^9H^{18}Az^2O^4$ chacun, soit $C^8H^{16}Az^2O^4$ et $C^{10}H^{20}Az^2O^4$. Arrivée à cette limite, la décomposition entraînerait la formation de leucines et de leucéines.

Je suis convaincu, d'après l'ensemble de mes expériences, que les choses se passent bien ainsi et que, une fois la limite d'hydratation atteinte, les produits formés et appartenant au type $2(C^mH^{2m}Az^2O^4)$ subissent une série de dédoublements qui ont pour résultat d'abord de faire passer des molécules compliquées à d'autres de plus en plus simples, mais du même type apparent, pour finir par la rupture des corps $C^nH^{2n}Az^2O^4$ en leucines $C^nH^{2n+1}AzO^2$ et en leucéines $C^nH^{2n-1}AzO^2$. Cette interprétation ne reçoit aucune atteinte de la présence des acides plus oxygénés rencontrés dans le résidu fixe. D'abord ces acides n'y entrent que pour une faible part, et d'un autre côté ils peuvent être considérés comme dérivant des leucines, des leucéines ou des

glucoprotéines par la substitution de O à H^2:

$$C^n H^{2n+1} AzO^2 - H^2 + O = C^n H^{2n-1} AzO^3,$$
$$C^n H^{2n-1} AzO^2 - H^2 + O = C^n H^{2n-3} AzO^3,$$
$$C^{2n} H^{4n} Az^2O^4 - H^4 + O^2 = C^{2n} H^{4n-4} Az^2O^6.$$

Ce que nous avons dit de la génération successive des glucoprotéines, des leucines et des leucéines, s'applique donc aussi à ces acides.

On peut donc poser :

1 molécule d'albumine = [polynôme] + $C^9 H^{11} AzO^3$ + imide de forme $x(C^n H^{2n-4} Az^2 O^2)$ + imide de forme $y(C^m H^{2m-8} Az^2 O^4)$.

Chacun de ces imides, fixant autant de molécules d'eau qu'il contient d'atomes d'azote, donne des termes amidés de la forme

$$x(C^n H^{2n} Az^2 O^4) \text{ et } y(C^m H^{2m-4} Az^2 O^6).$$

Si nous voulons pousser un peu plus loin l'analyse quantitative du résidu fixe, nous tiendrons principalement compte des données suivantes :

1° Le résidu fixe contient 3,2-3,5 de tyrosine, soit 1 molécule pour 5473 d'albumine;

2° La baryte non précipitable par l'acide carbonique, déduction faite de celle qui sature l'acide acétique, correspond à 6 équivalents pour 1 molécule d'albumine;

3° La formule bibasique $C^9 H^{16} Az^2 O^6$ représente la moyenne des acides amidés forts. Le résidu fixe renferme donc $3(C^9 H^{14} Az^2 O^6)$;

4° Le poids de la leucine et de la leucéine réunies est d'environ 15 à 16 pour 100; $3(C^{12} H^{24} Az^2 O^4)$ pour 1 molécule d'albumine correspondent à 14 pour 100;

5° La glucoprotéine $C^7 H^{14} Az^2 O^4$ n'entre guère pour plus de 6 à 7 pour 100 dans le poids du résidu ;

$$2(C^7 H^{14} Az^2 O^4)$$

pour 1 molécule d'albumine correspondent à 7 pour 100.

On a ainsi :

$C^{221}H^{435}Az^{49}O^{105}$ [résidu fixe de l'équation (1)]
$= C^9H^{11}AzO^3$ (tyrosine)
$+ [3C^9H^{16}AzO^6)$ (moyenne des acides amidés forts)
$+ 3(C^9H^{20}Az^2O^4)$ (leucines),
formant ensemble un groupement $6(C^9H^{18}Az^2O^5)]$
$+ 2(C^7H^{14}Az^2O^4) + 16(C^9H^{18}Az^2O^4)$.

Rien n'indique comment se fait le partage des glucoprotéines primordiales en glucoprotéines plus simples de formule $C^nH^{2n}Az^2O^4$.

En effet, $C^{18}H^{36}Az^4O^8$ peut se scinder en $2(C^9H^{18}Az^2O^4)$ ou en

$$C^{10}H^{20}Az^2O^4 + C^8H^{16}Az^2O^4,$$

ou en

$$C^{11}H^{22}Az^2O^4 + C^7H^{14}Az^2O^4,$$

ou en

$$C^{12}H^{24}Az^2O^4 + C^6H^{12}Az^2O^6.$$

La même incertitude ne subsiste plus lorsque, au lieu d'envisager les combinaisons moléculaires des leucines et des leucéines ou les glucoprotéines, on s'adresse aux leucines et aux leucéines elles-mêmes. Ainsi la quantité $16(C^9H^{18}Az^2O^4)$ ou $C^{164}H^{288}Az^{32}O^{64}$ ne peut se décomposer que d'une manière, en termes en C^6, C^5 et C^4, lorsque la quantité de ceux en C^6 est connue. Avec 6 termes en C^6 on ne peut avoir que 22 termes en C^4 et 4 termes en C^5, auxquels il faut ajouter $3(C^5H^{11}AzO^2) + 3(C^{11}H^9AzO^2)$, correspondant au groupement $6(C^9H^{18}Az^2O^5)$ qui donne en même temps les acides forts. On voit, d'après cela, que l'acide amidobutyrique et son complément $C^4H^7AzO^2$ doivent dominer dans le résidu fixe. Cette conclusion est conforme aux résultats expérimentaux.

Je ne me dissimule pas qu'il reste encore des questions de détail à éclaircir pour arriver à une solution complète et définitive. Ainsi, il conviendra de fixer le véritable poids

moléculaire des diverses glucoprotéines; mais les traits généraux de la réaction sont nettement établis.

COMPLÉMENT.

Comme complément, nous donnerons les détails de quelques analyses immédiates faites sur des résidus fixes de diverses origines.

I. Albumine coagulée purifiée par le procédé de M. Wurtz, chauffée pendant huit jours entre 140 et 150 degrés avec 2 parties de baryte. La baryte est précipitée par l'acide carbonique seulement; le liquide, filtré et concentré, a fourni successivement deux cristallisations, l'une de 20 grammes, l'autre de 8 grammes pour 90 de matière. Les eaux mères précipitées par le nitrate mercurique donnent un précipité blanc floconneux qui, lavé et décomposé par l'hydrogène sulfuré, fournit un acide cristallisé dont voici l'analyse :

		Théorie pour $C^9H^{16}Az^2O^6$.
Carbone...........	42,94	43,5
Hydrogène..	6,82	6,4
Azote.............	11,00	11,2

Ces nombres conduisent à la formule $C^9H^{16}Az^2O^6$. Les deux cristallisations aqueuses réunies, purifiées par solution dans l'eau, décoloration par le noir animal et cristallisation fractionnée, ont donné dans l'ordre des dépôts et de la solubilité croissante :

1° De la tyrosine;

2° Une petite quantité d'un corps cristallisé en houppes formées de prismes aplatis, assez allongés et distincts, peu soluble dans l'eau froide. Cette substance a donné :

		Théorie pour la formule $C^7H^{15}AzO^2$.
Carbone...........	57,07	57,9
Hydrogène.........	10,28	10,3
Azote.............	10,00	9,66

Ces nombres se rapprochent de ceux de l'homologue supérieur de la leucine $C^7H^{15}AzO^2$ ou tombent entre cette formule et celle de la leucine. C'est, du reste, la seule et unique fois que j'aie rencontré ce produit.

3° Un produit nacré, le plus abondant de tous, voisin de la leucine caproïque et donnant :

Carbone..................	54,54
Hydrogène................	9,51

C'est un mélange de leucine et de leucéine caproïques. Cette analyse immédiate n'a pas été poussée plus loin.

II. Albumine coagulée chauffée cent vingt heures à 140 degrés, avec 2 parties d'hydrate de baryte. La baryte est précipitée par l'acide carbonique et par l'acide sulfurique; la liqueur filtrée est concentrée. On obtient successivement trois cristallisations. La première est formée d'un mélange de tyrosine et de leucine caproïque; la deuxième est un mélange de leucine et de leucéine caproïques; la troisième est dissoute dans l'eau ammoniacale; on concentre et l'on sépare un mélange de leucine et de leucéine caproïques; les eaux mères sont évaporées à sec et le résidu est repris par l'alcool absolu; la liqueur filtrée est concentrée; elle donne par refroidissement un dépôt cristallisé dont l'analyse conduit à la formule

$$C^9H^{20}Az^2O^4 = C^5H^{11}AzO^2 + C^4H^9AzO^2 :$$

		Théorie.
Carbone............	48,88	49,0
Hydrogène..........	8,96	9,0
Azote..............	13,00	12,7

Les eaux mères des cristallisations aqueuses étant desséchées et le résidu épuisé par l'alcool fort, la solution concentrée fournit une cristallisation dont l'analyse conduit à la formule $C^8H^{16}Az^2O^4$:

		Théorie.
Carbone.............	47,07	47,0
Hydrogène...........	7,96	7,8
Azote...............	13,80	13,7

III. Albumine coagulée chauffée vingt-huit heures à 150 degrés avec 2 parties d'albumine. La baryte est précipitée par un courant d'acide carbonique, puis par l'ammoniaque et le carbonate d'ammoniaque. Par concentration et refroidissement, on obtient une cristallisation abondante qui est reprise par l'alcool bouillant à 90 pour 100; on sépare de la tyrosine insoluble; le liquide refroidi fournit des feuillets, mélange de leucine et de leucéine caproïques; l'alcool mère est concentré et donne des cristaux dont l'analyse conduit à la formule $C^{11}H^{22}Az^{2}O^{4}$:

		Théorie.
Carbone..............	53,4	53,6
Hydrogène............	8,89	8,9
Azote.................	10,8	11,4

L'alcool mère de ces cristaux est séché et le résidu est repris par l'alcool absolu. On obtient deux cristallisations successives dont l'analyse conduit très-près de la formule $C^{9}H^{18}Az^{2}O^{4}$:

	I.	II.	Théorie.
Carbone.........	49,0	49,16	49,8
Hydrogène.......	8,3	7,98	8,2

Les eaux mères de la cristallisation aqueuse sont séchées et le résidu est repris par l'alcool absolu bouillant, à plusieurs reprises. Les solutions concentrées déposent des grumeaux semi-cristallins; les premiers dépôts fournissent à l'analyse les nombres suivants, qui se rapprochent du type $C^{n}H^{2n}Az^{2}O^{4}$ ($n = 9$ à 8) :

	I.	II.
Carbone............	50,08	48,0
Hydrogène..........	8,2	8,1
Azote..............		13,6

Le dernier épuisement concentré donne une cristallisation confuse, répondant à la formule $C^8H^{16}Az^2O^4$:

		Théorie.
Carbone..............	47,0	47,0
Hydrogène............	8,0	7,8

Il reste une partie insoluble dans l'alcool absolu, donnant des nombres répondant à la formule $C^7H^{14}Az^2O^4$:

		Théorie.
Carbone.............	44,2	44,2
Hydrogène...........	7,6	7,37
Azote...............	14,8	14,78

Dans cette opération, on a épuisé toute la masse du résidu fixe et tous les produits isolés ont été analysés. Il est à remarquer que l'action de la baryte a été très-ménagée, puisqu'elle ne s'est exercée que pendant vingt-huit heures, dans la proportion de 2 parties sur 1 partie d'albumine. La plupart des termes isolés sont des glucoprotéïnes $C^nH^{2n}Az^2O^4$.

IV. L'expérience suivante prouve qu'il est indifférent de commencer l'hydratation et le dédoublement de l'albumine par d'autres agents moins énergiques que la baryte. En faisant intervenir la baryte pour terminer la réaction sur les produits d'une hydratation incomplète, on atteint en fin de compte le même résultat que dans les expériences précédentes.

L'albumine coagulée par la chaleur et encore humide, bouillie avec de l'acide sulfurique étendu, 1 partie d'acide concentré pour 5 parties d'eau, se scinde en deux parts à peu près égales ; l'une est soluble et l'autre insoluble dans l'eau.

La partie insoluble dans l'eau, mais soluble dans les alcalis et les carbonates alcalins, à laquelle j'ai donné le

nom d'*hémiprotéine*, a fourni à l'analyse les nombres suivants :

Carbone	53,33	52,66
Hydrogène...........	7,31	7,01
Azote	14,27	14,5

qui prouvent tout au moins que l'albumine s'est assimilée les éléments de l'eau, puisque le rapport atomique de l'azote à l'oxygène est très-près de 2 : 3 au lieu d'être de 1 : 1 environ.

L'hémiprotéine, chauffée en vase clos avec de l'hydrate de baryte, a donné, comme l'albumine, de l'ammoniaque, des acides carbonique, oxalique et acétique, en proportions à peu près semblables, et un résidu fixe dont la solution aqueuse, purgée de baryte par l'acide carbonique et l'acide sulfurique, a fourni par concentrations et cristallisations successives :

1° De la tyrosine;

2° Une cristallisation abondante dont voici l'analyse :

Carbone..................	53,2
Hydrogène................	9,00

nombres qui conduisent à la formule $C^{11}H^{22}Az^{2}O^{5}$;

3° Une cristallisation en grains peu abondants, qui conduit à la formule $C^{10}H^{20}Az^{2}O^{4}$:

		Théorie.
Carbone	52,09	51,8
Hydrogène..	8,60	8,6

Les eaux mères des cristallisations précédentes évaporées à sec ont fourni un résidu qui, traité par l'alcool bouillant, a donné une solution déposant par refroidissement des cristaux blancs non nacrés dont voici l'analyse :

Carbone..................	48,95
Hydrogène................	8,21
Azote	12,88

correspondant à la formule $C^9H^{18}Az^2O^4$, qui exige :

Carbone	49,5
Hydrogène	8,2
Azote	12,8

Le résidu, insoluble dans l'alcool, a donné des nombres correspondant à la formule $C^7H^{14}Az^2O^4$:

		Théorie.
Carbone	44,09	44,2
Hydrogène	7,49	7,36
Azote	14,3	14,7

Ce fractionnement sommaire ne fournit donc que des termes du type $C^nH^{2n}Az^2O^4$. Le résidu fixe lui-même avait donné :

		Théorie pour $C^9H^{18}Az^2O^4$.
Carbone	49,58	49,5
Hydrogène	8,18	8,2
Azote	13,07	12,8

Voici encore d'autres analyses de corps cristallisés obtenus dans des circonstances analogues, au moyen de l'hémiprotéine chauffée avec la baryte :

Carbone	51,08	49,63	50,93	48,56	49,99	49,2
Hydrogène	8,27	8,17	8,5	7,91	8,55	7,9
Azote	»	12,5	»	13,07	12,4	»

Elles se rapportent toutes à des corps du type $C^nH^{2n}Az^2O^4$ ou à des mélanges de ces corps avec ceux du type $C^nH^{2n+1}AzO^2$.

V. Un résidu fixe, qui avait donné, à l'analyse :

Carbone	48,5
Hydrogène	8,0
Azote	12,5

a fourni les cristallisations suivantes :

1° Dans l'eau :

	N° 1, abondante.	N° 2, peu abondante.
Carbone.........	52,61	54,08
Hydrogène.......	8,70	8,34

La cristallisation n° 1 se rapproche de $C^{14}H^{22}Az^{2}O^{4}$ avec excès de $C^{5}H^{10}AzO^{2}$; la cristallisation n° 2 doit son excès de carbone et la diminution d'hydrogène à la présence de proportions notables de tyrosine.

2° Les eaux mères ont été évaporées à sec et le résidu a été repris par l'alcool à 90 pour 100 bouillant. Cette solution alcoolique, concentrée à sec, laisse un résidu qui donne à l'analyse les nombres

Carbone..................	47,5
Hydrogène................	7,98

correspondant à la formule $C^{8}H^{16}Az^{2}O^{4}$.

La partie insoluble dans l'alcool à 90 pour 100 donne des nombres conduisant à la formule $C^{7}H^{14}Az^{2}O^{4}$.

VI. Un résidu fixe provenant de l'action de 3 parties de baryte sur 1 partie d'albumine coagulée à 180 degrés, pendant quarante-huit heures, a été bouilli pendant vingt-quatre heures avec de l'eau chargée d'acide sulfurique (20 pour 100 d'acide). Débarrassé d'acide sulfurique par la baryte, il a donné à l'analyse :

Carbone..................	47,7
Hydrogène................	8,09
Azote....................	12,60

Sa composition n'a donc pas sensiblement changé sous l'influence d'une ébullition prolongée avec l'acide sulfurique étendu. 50 grammes de ce même résidu ont été dissous dans l'alcool; on a ajouté 11 grammes d'acide sulfurique monohydraté pur. Cette proportion est calculée d'après la teneur en azote du résidu fixe pour précipiter

la moitié de l'azote contenu dans le mélange sous forme de composés amidés. L'acide sulfurique forme en effet avec ceux-ci des combinaisons insolubles dans l'alcool.

Le précipité, redissous dans l'eau, a été débarrassé d'acide sulfurique par la baryte. Il a donné à l'analyse :

(*a*)	Carbone	46,97
	Hydrogène	8,12
	Azote	13,80

La partie non précipitée a été distillée; le résidu, repris par l'eau, a été débarrassé de traces d'acide sulfurique par la baryte; la solution, filtrée, a été évaporée à sec dans le vide et le résidu analysé. On a trouvé :

(*b*)	Carbone	48,76
	Hydrogène	8,14
	Azote	11,2

En ajoutant les deux analyses et en divisant par 2, on retrouve les nombres du mélange initial, ce qui constitue une vérification.

L'acide sulfurique a donc précipité un mélange de corps correspondant à la formule générale $C^nH^{2n}Az^2O^4$, analyse (*a*), $n = 8$.

Dans la masse restée en solution, le rapport de l'azote à l'oxygène est plus élevé que 1 : 2, à cause de la présence des acides forts qui se sont accumulés dans cette portion.

VII. L'opération suivante a été l'objet d'une analyse immédiate, poussée aussi loin que possible, sur un résidu fixe obtenu après six jours de chauffe.

200 grammes d'albumine coagulée ont été chauffés avec 600 grammes d'hydrate de baryte à 150-180 degrés, pendant six jours.

Le résidu fixe, privé de baryte par l'acide carbonique et l'acide sulfurique, a été séché et repris par l'alcool bouillant à 90 pour 100, jusqu'à épuisement. Les solutions

alcooliques ont été réunies (*liqueur* A). Il est resté une partie non dissoute B, du poids de 13 grammes environ.

Résidu B. — Il a été dissous à chaud dans l'eau ammoniacale; l'ammoniaque ayant été expulsée par évaporation dans une capsule, il s'est séparé une abondante cristallisation (a) de tyrosine, du poids de $3^{gr},6$; l'eau mère des cristaux (a), concentrée à nouveau, a fourni une cristallisation (b); enfin la dernière eau mère, séchée, a laissé un résidu (c).

Cristaux (b). — Repris par l'alcool bouillant, ils laissent un résidu (b_a) pesant $0^{gr},1$ et offrant les caractères de la tyrosine; la solution dépose par refroidissement des cristaux en feuillets b_b, donnant à l'analyse les nombres suivants :

Matière, 0,3135; acide carbonique, 0,621; eau, 0,2675.

Carbone..................	54,02
Hydrogène..............	9,8

Les cristaux b_b offrent donc la composition et les propriétés de la leucine caproïque.

L'eau mère alcoolique des cristaux b_b est réunie à la liqueur A, son petit volume ne permettant plus de la traiter isolément.

Résidu c. — Il est repris par l'alcool à 90 pour 100 bouillant; on a une solution c_a et un résidu c_b.

La solution c_a concentrée dépose par refroidissement des cristaux groupés en houppes d'aiguilles $c_a a$, dont l'analyse a donné $c_a a$:

Matière, 0,291; acide carbonique, 0,568; eau, 0,237.

Carbone..................	53,2
Hydrogène..............	9,0

correspondant à la formule $C^{11}H^{22}Az^2O^4$.

Les eaux mères, peu abondantes, des cristaux $c_a a$ son réunies à la liqueur A.

Le résidu c_b, peu abondant, s'est révélé à l'examen microscopique comme formé d'un mélange de tyrosine et de leucine caproïque. Le résidu B a donc fourni les corps suivants : tyrosine, leucine caproïque, glucoprotéine

$$C^{11}H^{22}Az^2O^4.$$

Liqueur A. — La solution alcoolique A donne par refroidissement une abondante cristallisation A_a dont le poids, après expression et dessiccation, s'élève à 48 grammes, soit à 24 pour 100 d'albumine, et une eau mère alcoolique A_b.

Cristaux A_a. — Ils sont dissous dans l'eau chaude; la liqueur est décolorée par le noir animal, filtrée, concentrée et refroidie. On obtient une cristallisation $A_a a$. L'eau mère, concentrée à nouveau, donne une seconde cristallisation $A_a b$, dont l'eau mère de nouveau concentrée cristallise de nouveau; les cristaux obtenus sont réunis à $A_a b$. La dernière eau mère de ces trois cristallisations successives, évaporée à consistance de sirop, se prend en un magma cristallin $A_a c$.

Les cristaux $A_a a$ sont traités par l'alcool à 90 pour 100 bouillant; il reste une partie non dissoute $A_a a_1$, cristallisant sous le microscope, dans sa solution aqueuse, en houppes formées de prismes aplatis rayonnant d'un centre, avec des arborescences, et l'on obtient une solution $A_a a_2$. Les cristaux $A_a b$ sont traités par l'alcool à 90 pour 100 bouillant. On a une partie non dissoute $A_a b_1$ et une solution $A_a b_2$.

Les résidus $A_a a_1$ et $A_a b_1$ sont réunis et dissous dans l'alcool bouillant; par refroidissement, on a des cristaux abondants en feuillets blancs, sans mélange de tyrosine, $A_a(a_1 b_1)a_1$; l'eau mère concentrée fournit une nouvelle cristallisation $A_a(a_1 b_1)a_2$ de même apparence. L'eau mère alcoolique de ces deux dépôts $A_a(a_1 b_1)a_3$ est réunie à d'autres eaux mères (*voir* plus loin).

L'analyse des cristaux $A_a(b_1 b_1)a_1$ donne :

Matière, 0,2365; acide carbonique, 0,4725; eau, 0,2075.

Carbone	54,48
Hydrogène	9,74

Ces nombres correspondent à la leucine caproïque.

Les cristaux $A_a(a_1 b_1)a_2$, en tout semblables aux premiers, n'ont pas été analysés; ils représentent aussi de la leucine caproïque.

La solution alcoolique $A_a a_2$ a donné par refroidissement une cristallisation en feuillets $(A_a a_2)a_1$ et une eau mère $(A_a a_2)a_2$. Les cristaux $(A_a a_2)a_1$ sont dissous dans l'eau chaude; la solution concentrée donne successivement des cristaux $[(A_a a_2)a_1]a_1$, $[(A_a a_2)a_1]a_2$ et une eau mère $[(A_a a_2)a_1]a_3$.

L'analyse des cristaux $[(A_a a_2)a_1]a_1$ a donné :

Matière, 0,308; acide carbonique, 0,6145; eau, 0,277.

Carbone	54,4
Hydrogène	9,98

L'analyse des cristaux $[(A_a a_2)a_1]a_2$ a donné :

Matière, 0,326; acide carbonique, 0,649; eau, 0,290;

Carbone	54,5
Hydrogène	9,8

Ces deux analyses montrent que les corps isolés sont de la leucine caproïque.

L'eau mère alcoolique $(A_a a_2)a_2$ est concentrée; elle donne, par refroidissement, des houppes isolées, adhérentes aux parois du vase sous forme de mamelons composés de fines aiguilles, courtes et aplaties, réunies autour d'un centre $[(A_a a_2)a_2]a_1$; il reste une eau mère

$$[(A_a a_2)a_2]a_2.$$

L'analyse des cristaux $[(A_a a_2) a_2] a_1$ a donné :

Matière, 0,285; acide carbonique, 0,569; eau, 0,238.

Carbone.................	54,45
Hydrogène..............	9,27

nombres qui correspondent à un mélange de leucine et de leucéine caproïque ou se rapprochent de ceux du composé $C^{11}H^{22}Az^2O^4$.

L'eau mère $[(A_a a_2) a_2] a_2$ concentrée et refroidie fournit des cristaux $[(A_a a_2) a_2] a_2 a_1$ et une eau mère

$$[(A_a a_2) a_2] a_2 a_2.$$

L'analyse des cristaux $[(A_a a_2) a_2] a_2 a_1$ a donné :

Matière, 0,2915; acide carbonique, 0,5785; eau, 0,242.

Carbone.................	54,12
Hydrogène..............	9,22

nombres également très-voisins de ceux de la formule $C^{11}H^{22}Az^2O^4$.

La solution alcoolique $A_a b_2$ a donné, par refroidissement rapide, des cristaux en feuillets, que l'on a réunis aux cristaux $(A_a a_2) a_1$; l'alcool mère de ces cristaux a été concentré et a donné, par refroidissement, une nouvelle cristallisation $(A_a b_2) a_1$ et une eau mère $(A_a b_2) a_2$. Les cristaux $(A_a b_2) a_1$, dissous dans l'eau bouillante, ont donné, après concentration, deux cristallisations successives en feuillets $[(A_a b_2) a_1] a_1$, $[(A_a b_2) a_1] a_2$ et une eau mère qui a été réunie à $[(A_a a_2) a_1] a_3$.

L'analyse des deux cristallisations précédentes a donné, pour $[(A_a b_2) a_1] a_1$:

Matière, 0,329; acide carbonique, 0,659; eau, 289.

Carbone.................	54,62
Hydrogène..............	9,76

pour $[(A_a b_2) a_1] a_2$:

Matière, 0,2895; acide carbonique, 0,577; eau, 0,244.

Carbone................	54,35
Hydrogène..............	9,36

Ces analyses se rapportent à la leucine caproïque souillée plus ou moins de leucéine.

L'eau mère alcoolique $(A_a b_2) a_2$ est concentrée; elle donne des cristaux en mamelons isolés $[(A_a b_2) a_2] a_1$ et une eau mère $[(A_a b_2) a_2] a_2$.

L'analyse de $[(A_a b_2) a_2] a_1$ a donné :

1° Matière, 0,325; acide carbonique, 0,652; eau, 0,271.
2° Matière, 0,315; V = 28cc; H = 758°; T = 19°; V' = 25cc,5;

Carbone................	54,71
Hydrogène..............	9,26
Azote..................	10,1

nombres qui correspondent au composé $C^{12}H^{24}Az^2O^4$.

L'eau mère $[(A_a b_2) a_2] a_2$ est concentrée et donne, par refroidissement, un dépôt cristallisé $[(A_a b_2) a_2] a_2 a_1$ et une eau mère $[(A_a b_2) a_2] a_2 a_2$.

L'analyse des cristaux $[(A_a b_2) a_2] a_2 a_1$ a donné :

Matière, 0,282; acide carbonique, 0,571; eau, 0,231.

Carbone................	55,12
Hydrogène..............	9,10

Les eaux mères $[(A_a a_2) a_1] a_2$, $[(A_a a_2) a_2] a_2 a_2$, $[(A_a b_2) a_2] a_2 a_2$, $(A_a b_2) a_2$, $[A_a (b_1 a_1)] a_2$ sont réunies et concentrées; on obtient ainsi une cristallisation formée de lames de leucine mêlées à des houppes $(A_a a_2 b_2) a_1$, dont l'analyse a donné :

Matière, 0,265; acide carbonique, 0,518; eau, 0,227.

Carbone................	53,3
Hydrogène..............	9,5

mélange de leucines caproïque et valérique $C^{11}H^{24}Az^2O^4$.

Les dernières eaux mères de ces cristaux ont été jetées, vu leur peu d'importance.

L'analyse des cristallisations $A_a a$ et $A_a b$ se trouve ainsi poussée à ses dernières limites. On y a trouvé de la leucine caproïque, les composés intermédiaires $C^{12}H^{24}Az^2O^4$ et $C^{11}H^{22}Az^2O^4$, et de la leucine valérique $C^5H^{11}AzO^2$ en mélange avec de la leucine caproïque $C^6H^{13}AzO^2$.

La masse cristalline $A_a c$, provenant de l'évaporation de l'eau mère des cristallisations $A_a a$ et $A_a b$, a été traitée par l'alcool à 90 pour 100 bouillant; il est resté un résidu peu abondant $(A_a c) a_1$. La solution refroidie a donné des cristaux en mamelons isolés ayant la forme de choux-fleurs $(A_a c) a_2$ et une eau mère $(A_a c) a_3$.

Les cristaux $(A_a c) a_2$ ont donné :

Matière, 0,3425; acide carbonique, 0,607; eau, 0,265.

Carbone................	48,33
Hydrogène..............	8,76

Ces nombres se rapportent à un corps très-voisin de $C^9H^{20}Az^2O^4$, avec excès de leucine butyrique.

L'eau mère $(A_a c) a_3$, concentrée et refroidie, donne un second dépôt cristallisé $(A_a c) a_4$ et une eau mère $(A_a c) a_5$.

L'analyse des cristaux $(A_a c) a_4$ a donné :

Matière, 0,278; acide carbonique, 0,5085; eau, 0,223.

Carbone................	49,88
Hydrogène..............	8,93

nombres qui concordent avec ceux de la formule

$$C^9H^{20}Az^2O^4 = C^5H^{11}AzO^2 + C^4H^9AzO^2,$$

mélange ou combinaison à équivalents égaux de leucines valérique et butyrique.

L'eau mère $(A_a c) a_5$ concentrée donne des cristaux

$(A_a c) a_6$ et une eau mère $(A_a c) a_7$, qui a été négligée à cause de son petit volume.

L'analyse des cristaux $(A_a c) a_6$ a donné :

Matière, 0,3475 ; acide carbonique, 0,6355 ; eau, 0,266.

Carbone	49,8
Hydrogène	8,50

nombres représentant le composé précédent avec un petit déficit d'hydrogène dû à la présence de leucéines.

Le résidu $(A_a c) a_1$ redissous dans l'eau, débarrassé par l'acide sulfurique d'un peu de baryte, décoloré par le noir, et la solution étant fortement concentrée, puis précipitée par l'alcool fort, a donné à l'analyse des nombres qui indiquent la présence d'un acide plus oxygéné. Les résultats conduisent approximativement à la formule $C^9 H^{16} Az^2 O^6$, que l'on peut décomposer ainsi : $C^5 H^7 Az O^3 + C^4 H^9 Az O^2$:

1° Matière, 0,341 ; acide carbonique, 0,591 ; eau, 0,213 ;
2° Matière, 0,490 ; acide sulfurique normal saturé par l'ammoniaque dégagée sous l'influence de la chaux sodée, 4^{cc},1.

	I.	II.	Théorie.
Carbone	47,26	»	46,5
Hydrogène	6,94	»	6,9
Azote	»	11,8	12,0

Les cristaux A_a contiennent donc, outre les composés extraits de $A_a a$ et de $A_a b$, une certaine quantité de leucines valérique et butyrique, et probablement de l'acide glutimique.

Eau mère A_b. — Cette eau mère concentrée donne, par refroidissement, une cristallisation $A_b a_1$ que l'on sépare à la trompe et une eau mère que l'on distille et dont on sèche le résidu $A_b b_1$.

Les cristaux $A_b a_1$ sont dissous à chaud dans l'alcool fort. La solution refroidie dépose des cristaux adhérents, ayant

l'apparence de houppes formées de fines aiguilles réunies au centre $A_b a_2$; on a, en plus, une eau mère alcoolique $A_b a_3$.

Les cristaux $A_b a_2$ ont donné à l'analyse :

Matière, 0,3325; acide carbonique, 0,651; eau, 0,274.

Carbone................	53,4
Hydrogène.............	9,15

Ces nombres conduisent à la formule $C^{11}H^{22}Az^2O^4$ déjà trouvée.

L'eau mère $A_b a_3$, concentrée et refroidie, donne des cristaux $A_b a_4$ et une eau mère qui est négligée à cause de son petit volume.

L'analyse des cristaux $A_b a_4$ a donné :

Matière, 0,319; acide carbonique, 0,622; eau, 0,257.

Carbone................	53,18
Hydrogène.............	8,95

nombre qui ne diffère pas beaucoup des précédents.

Résidu $A_b b_1$ *ou* R. — Le résidu R a été séché à 100 degrés dans le vide et traité, à plusieurs reprises, par l'alcool absolu et bouillant. Les liquides sont séparés à chaud; on obtient ainsi les solutions R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 et un résidu non dissous R_6. Ce dernier est repris par l'alcool à 90 pour 100 bouillant, qui le dissout, solution R_7, en laissant une masse brune emplastique peu abondante (2 à 3 grammes au plus), que l'on néglige.

R_1 dépose, après refroidissement, une cristallisation abondante $R_1 a_1$, que l'on sépare et exprime; le liquide, filtré et concentré à nouveau, donne, après refroidissement, une seconde cristallisation $R_1 a_2$, dont l'eau mère concentrée donne une troisième cristallisation $R_1 a_3$; la dernière eau mère $R_1 a_4$ est distillée à consistance sirupeuse.

Les cristaux $R_1 a_1$, $R_1 a_2$, $R_1 a_3$ sont réunis et dissous dans l'alcool bouillant à 90 pour 100; la solution $R_1 A$, concentrée et refroidie, fournit une abondante cristallisation en mamelons adhérents $R_1 A_1$; l'eau mère concentrée donne, par refroidissement, un magma cristallin que l'on délaye dans l'alcool fort; la seconde cristallisation $R_1 A_2$ peut être ainsi séparée et exprimée. L'eau mère alcoolique de $R_1 A_2$ dépose, du jour au lendemain, des cristaux en houppes formées de fines aiguilles $R_1 A_3$; l'eau mère peu abondante (5 à 6 centimètres cubes) de ces derniers cristaux est négligée.

L'analyse de $R_1 A_1$ a donné :

Matière, 0,2445; acide carbonique, 0,4395; eau, 0,190.

Carbone.................	49,02
Hydrogène............ .	8,63

Ces nombres se rapportent à un mélange de leucines valérique et butyrique dominant avec un peu de leucéine.

Les cristaux $R_1 A_2$ ont été dissous à chaud dans l'alcool absolu; la solution refroidie fournit une cristallisation $R_1 A_2 a_1$ et une eau mère qui ne retient presque plus rien et que l'on néglige.

L'analyse des cristaux $R_1 A_2 a_1$ a donné :

Matière, 0,2205; acide carbonique, 0,3775; eau, 0,1705.

Carbone.................	46,69
Hydrogène.	8,59

Ces nombres sont ceux de la leucine butyrique $C^4H^9AzO^2$.

L'analyse des cristaux $R_1 A_3$ a donné :

Matière, 0,339; acide carbonique, 0,500; eau, 0,243.

Carbone.................	40,22
Hydrogène.............	7,96

nombres qui concordent avec ceux de la leucine propionique ou alanine $C^3A^7AzO^2$.

La solution R_2, abandonnée à elle-même pendant vingt-quatre heures, a déposé des flocons grumeleux peu abondants R_1a_1, nageant dans la liqueur et dont l'eau mère alcoolique concentrée a donné des cristaux R_2a_2; enfin l'eau mère de ces cristaux a été réunie à R_1a_4. Les solutions R_3 et R_4, refroidies pendant vingt-quatre heures, ont donné des flocons grumeleux assez abondants que l'on réunit (cristaux $R_3R_4a_1$); le liquide filtré a été employé tel quel pour opérer le cinquième épuisement R_5 du résidu R.

La solution R_5 a fourni, par refroidissement, des cristaux floconneux que l'on a joint à $R_3R_4a_1$; l'eau mère concentrée a donné un second dépôt floconneux ajouté aussi à $R_3R_4a_1$; l'eau mère, concentrée à nouveau, donne un nouveau dépôt que l'on joint aux premiers; la dernière eau mère est ajoutée à R_1a_4.

La solution R_7, obtenue avec l'alcool ordinaire agissant sur le résidu des épuisements de R par l'alcool absolu, a été additionnée de son volume d'alcool absolu; il s'est formé un dépôt floconneux R_7a_1 que l'on a exprimé, tandis que l'eau mère R_7a_2 a été décolorée par le noir animal et évaporée presque à sec. Le résidu, repris par l'alcool à 95 pour 100, donne une solution qui, en se refroidissant, dépose des cristaux adhérents en boules R_7a_3; l'eau mère de ces cristaux donne, après concentration, une nouvelle cristallisation analogue R_7a_4; la dernière eau mère est négligée.

L'analyse de R_7a_3 a donné :

Matière, 0,300; acide carbonique, 0,537; eau, 0,2375.

L'analyse de R_7a_4 a donné :

Matière, 0,230; acide carbonique, 0,411; eau, 0,184.

	R_7a_3.	R_7a_4.	$C^9H^{20}Az^2O^4$.
Carbone......	48,8	48,73	49,0
Hydrogène....	8,78	8,88	9,0

Ces nombres correspondent sensiblement avec la formule $C^9H^{20}Az^2O^4$ avec excès de $C^4H^9AzO^2$.

Les cristallisations R_2a_1, R_2a_2, R_7a_1, $R_3R_4a_1$, offrant la même apparence de flocons grumeleux, ont été réunies en masse M et traitées par l'alcool bouillant à 90 pour 100. La solution concentrée donne une abondante cristallisation en mamelons blancs M_1; l'eau mère M_2 est concentrée; elle se prend en une masse cristalline formée de fines aiguilles aplaties, groupées en houppes M_3; on ajoute un peu d'alcool absolu et l'on exprime; l'eau mère, retenant fort peu de chose, est négligée.

L'analyse de M_1 a donné :

Matière, 0,253; acide carbonique, 0,4485; eau, 0,199.

Carbone................	48,34
Hydrogène..............	8,74

M_1 est donc identique avec R_7a_3 et R_7a_4.

L'analyse de M_3 a donné :

Matière, 0,356; acide carbonique, 0,587; eau, 0,253.

Carbone................	44,9
Hydrogène..............	7,89

Cette analyse se rapproche sensiblement de celle d'un mélange à équivalents égaux de leucines butyrique et propionique $C^4H^9AzO^2 + C^3H^7AzO^2$. L'hydrogène est un peu faible et conduit à une formule intermédiaire entre $C^7H^{16}Az^2O^4$ et $C^7H^{14}Az^2O^4$.

L'eau mère alcoolique R_1a_4 des cristallisations R_1a_1, R_1a_2, R_1a_3 a été évaporée à consistance sirupeuse; le résidu a été repris par l'eau et décoloré par le noir animal; la solution filtrée a été évaporée à consistance fortement sirupeuse et traitée par un grand excès d'alcool absolu froid qui a presque tout dissous, sauf une matière emplastique peu importante comme masse. La solution alcoolique, concentrée par distillation, a été additionnée d'éther; il

s'est formé un précipité emplastique amorphe $R_1 a_5$ qui a donné à l'analyse les nombres suivants :

1° Matière, 0,4355; acide carbonique, 0,772; eau, 0,300;
2° Matière, 0,405; acide carbonique, 0,717; eau, 0,269;
3° Matière, 0,2845; acide carbonique, 0,5215; eau, 0,189;
4° Matière, 0,486; V=60^{cc},4; H=760; T=18°,5; V'=56,4;
5° Matière, 0,493; V=56^{cc},4; H=765; T=19°; V'=51,57.

En centièmes, on a :

	1°.	2°.	3°.	4°.	5°.
Carbone.....	48,34	48,5	49,9	»	»
Hydrogène..	7,44	7,40	7,48	»	»
Azote......	»	»	»	13,4	13,14

Ces nombres correspondent à ceux d'une leucéine $C^n H^{2n-1} AzO^2$ ou plutôt d'un mélange de deux leucéines pour lesquelles $n=4$ et 5.

	Théorie pour	
	$C^8H^{16}Az^2O^4$.	$C^8H^{14}Az^2O^4$.
Carbone...........	50,0	47,5
Hydrogène.........	7,4	6,93
Azote..............	12,96	13,8

Le mélange d'alcool et d'éther d'où s'est séparé le corps précédent, étant évaporé à sec, a fourni un résidu sirupeux peu abondant, qui ne présente pas les caractères d'un principe défini. Son analyse a donné :

Carbone............	53,00—54,00
Hydrogène...........	7,5 — 7,6
Azote...............	11,8 —10,7

Ces nombres paraissent cependant se rapporter à une leucéine $C^n H^{2n-1} AzO^2$ avec $n = 5$ souillée d'autres produits.

En résumé, dans cette analyse, nous n'avons guère rencontré que des leucines et des leucéines, et tout au plus quelques cristallisations intermédiaires

$C^{12}H^{24}Az^2O^4$, $C^{11}H^{22}Az^2O^4$.

Dans un prochain Mémoire, nous appliquerons la même méthode expérimentale à l'étude de composés analogues à l'albumine.

J'ai été très-efficacement secondé dans ce long travail par le zèle dévoué et intelligent de mon préparateur, M. Bourgeois, et de mon aide de laboratoire, M. Porlier. Je suis heureux de pouvoir leur en témoigner publiquement ma reconnaissance.

ÉTUDE SUR LE CAFÉ, LE THÉ ET LES CHICORÉES;

Par C. HUSSON,
Pharmacien à Toul.

L'usage du café, des chicorées et du thé se répand de plus en plus; aussi les falsifications que l'on fait subir à ces substances sont-elles nombreuses. Le but de cette Note est de rechercher ces fraudes; je demande à l'Académie de lui soumettre ce travail, qui fait suite à mes recherches sur le beurre, les cires et les matières grasses utilisées en pharmacie.

Pour cette étude, M. Fermond a conseillé l'emploi de la liqueur de Fehling. Quelques chiffres démontreront l'utilité de ce réactif.

Les meilleures chicorées du commerce que j'ai analysées renfermaient toutes au moins le tiers de leur poids de glucose ou de matière réduisant la liqueur de Fehling.

Or, le café, d'après M. Payen, ne contient que 15 pour 100 de ces substances.

La racine de chicorée des pharmacies (*Cichorium intybus*) renferme, d'après mes analyses, lorsqu'elle est sèche, de 11 à 12 pour 100 de glucose, soit, lorsqu'elle est torréfiée, 15 pour 100, ce qui est conforme aux données de MM. Graham Stenhouse et Campbelle.

Comme succédané, on utilise également la racine du

pissenlit (*Taraxacum dens Leonis*). Cette plante, semée dans les jardins à l'automne, est recouverte de terre pendant l'hiver.

Alors ses feuilles blanchissent et sa racine prend du sucre en proportion équivalente à celle qui se trouve dans la précédente.

Elle est amère, assez volumineuse et peut être utilisée dans la préparation de la chicorée torréfiée. J'ai pu, à l'aide de cette racine, en facilitant la fermentation par l'addition de levûre, obtenir un alcool dont l'odeur et la saveur tiennent tout à la fois de l'eau-de-vie de gentiane, de l'eau-de-vie de marc et de l'alcool amylique. J'ai l'honneur d'en adresser à l'Académie un échantillon préparé depuis trois ans.

En résumé, la racine de chicorée renferme par elle-même assez de glucose pour que le caramélage devienne une opération inutile, ne servant qu'à faciliter la fraude.

La chicorée, telle qu'elle est préparée aujourd'hui, n'est plus un amer destiné à combattre ce que le café peut avcir d'excitant, d'échauffant; c'est une matière végétale quelconque servant d'excipient au caramel.

Dans ce cas, si l'on tient à colorer le café, pourquoi ne pas employer simplement des tablettes de caramel?

Les lignes suivantes prouveront, je l'espère, combien cela serait préférable. Le but que se proposent les fabricants de chicorée est de livrer un produit ayant l'aspect et la couleur du café.

Or, la racine de chicorée torréfiée et même caramélisée a quelque chose de mat qu'on enlève par l'addition de 2 pour 100 de beurre, ce qui permet en même temps de fixer toutes sortes de colorants.

Le beurre frais serait un luxe pour cette opération, puisque le produit ne doit arriver au consommateur que cinq ou six mois après sa préparation. Pourquoi même employer du beurre rance, qui a du prix, lorsqu'on dispose de suif, de graisses sans valeur?

Au lieu de se servir de chicorée, ne vaudrait-il pas mieux ajouter au café du beurre frais ?

Cependant, dans les crémeries de Paris, le voyageur qui croit prendre un tonique avant ou après un long voyage est condamné à absorber une boisson faite avec un café qui contient 2 et même 4 pour 100 de suif rance : de là des accidents intestinaux souvent fort désagréables.

Il importe donc dans une analyse de mettre en évidence cette graisse et d'en déterminer la nature ; on y arrive par une opération qui peut paraître dangereuse et qui, cependant, est complétement inoffensive en suivant la marche que je vais indiquer.

On met dans un petit ballon 10 grammes de chicorée avec 50 grammes de glycérine et 20 gouttes d'acide chlorhydrique. Ce mélange est porté à l'ébullition pendant quelques minutes, puis le tout encore chaud est jeté sur une toile de manière que le liquide s'écoule dans une fiole à potion de 125 grammes. On ajoute à la glycérine filtrée un volume égal d'éther à 56 degrés ; on agite fortement et on place la fiole dans un récipient un peu plus haut que la bouteille et renfermant de l'eau en pleine ébullition.

Aussitôt les vapeurs éthérées, s'échappant en abondance, chassent l'air restant dans la bouteille. Alors on enflamme l'éther sans courir de danger. Sous l'influence de la chaleur la matière grasse monte, se ramasse à la surface de la glycérine et se dissout dans l'éther. Lorsque la flamme diminue d'intensité, on l'éteint et on laisse le reste de l'éther s'évaporer naturellement. La fiole se refroidit peu à peu. En hiver, la température s'abaisse suffisamment pour que la matière grasse cristallise ; en été, il est bon de placer la bouteille dans l'eau froide additionnée de quelques morceaux de glace ; une température de $+6^{\circ}$ à $+8^{\circ}$ paraît nécessaire pour l'opération. Après refroidissement, on passe sur la surface de la glycérine une baguette ou du papier tourné en allumette et l'on dépose une goutte du li-

quide enlevé sur une plaque de verre; puis on place le couvre-objet.

Au microscope, on observe des gouttelettes huileuses figées en partie, dans lesquelles on observe des cristaux qui caractérisent la matière grasse employée.

Ne voulant faire ni une réclame industrielle, ni un réquisitoire, je ne puis indiquer la marque de fabrique des chicorées que j'ai essayées. Je dirai seulement que ce sont des chicorées du Nord, à cachets très-estimés, qui m'ont servi à faire mes expériences.

L'échantillon xB, peut-être le plus vendu à Toul, m'a donné, dans ces conditions, des cristaux très-nets de stéarine *fig.* 1 (A, B, C).

Six ou sept jours après la réaction on voit, à l'œil nu, toute la matière grasse figée qui tapisse les parois du verre à la surface de la glycérine. L'examen microscopique montre alors des cristaux d'acide stéarique représentés (*fig.* 3) D, E, F, G.

Cette réaction m'a permis de déceler la chicorée xB dans du café qui n'en renfermait qu'un quart.

L'analyse faite sur un autre échantillon également très-recommandé YP m'a montré au microscope les cristaux de margarine. On voit d'abord dans les gouttelettes huileuses des petits filaments contournés de margarine (*fig.* 1, M); puis, quelques heures plus tard, on remarque la margarine ou l'acide margarique avec sa forme chevelue ou arborisée (*fig.* 1, M'). On voit également quelques globules gras figés, un peu polyédriques, dans lesquels on observe un commencement d'arborisation (*fig.* 1, O et L); à la longue on aperçoit bien une matière grasse à demi figée autour du verre, mais elle n'est pas prise en petits grains comme la précédente.

Il restait à démontrer que le café pur, dans ces conditions, ne donne pas la même cristallisation. Pour cela, 10 grammes de café ont été traités comme la chicorée. Aussitôt après l'évaporation de l'éther, sans attendre le re-

froidissement complet, on voit apparaître une quantité considérable d'aiguilles fines, s'entre-croisant ou réunies en masse confuse (*fig.* 2, A). Quelques-unes de ces aiguilles, plus larges que les autres, sont brisées et leurs extrémités sont dentelées, lacérées (*fig.* 2, A'). Enfin, on voit aussi quelques cristaux affectant la forme dendritique (*fig.* 2, B). Lorsque la cristallisation du café n'apparaît pas aussitôt, on expose la bouteille au soleil pendant quelques heures; les cristaux se forment alors. Les aiguilles que nous venons de décrire présentent tous les caractères des chlorures ammoniacaux (chlorhydrate d'ammoniaque, de méthylamine). Il restait à rechercher ce qu'elles pouvaient avoir de caractéristique. Voici les expériences entreprises à ce sujet.

En mettant 2 grammes, soit de café, soit de chicorée, dans un tube à réactif, avec 6 grammes d'eau distillée et un petit fragment de potasse, sous l'influence de l'ébullition il ne se dégage aucun gaz bleuissant le papier de tournesol; donc ces différentes substances ne renferment pas naturellement de sels ammoniacaux pouvant produire les cristaux observés.

En répétant l'expérience à sec, c'est-à-dire en plaçant dans un tube 2 grammes de chicorée du commerce et en laissant tomber à la surface de la poudre un morceau de potasse que l'on fait fondre ensuite à la flamme d'une lampe à alcool, dès que la potasse fondue arrive sur la poudre, celle-ci se boursoufle fortement, la matière gagne l'extrémité du tube en dégageant des vapeurs à odeur de caramel, mais non ammoniacales; puis la calcination commence, et avec elle seulement apparaissent des vapeurs blanches à odeur forte d'acroléine qui bleuissent ou plutôt verdissent le papier de tournesol.

Cette réaction est due à la décomposition des matières grasses et à l'action de la potasse sur les matières albuminoïdes de la chicorée.

En répétant l'expérience avec du café, dès que la potasse fondue arrive sur la poudre, celle-ci se soulève un peu

sans se boursoufler, sans dégager d'odeur de caramel, mais immédiatement les vapeurs bleuissent le papier de tournesol. Le café renferme donc un corps se décomposant moins facilement que les sels d'ammoniaque sous l'influence de la potasse et plus rapidement que les matières albuminoïdes.

Ce corps est connu : c'est la caféine, se décomposant en méthylamine sous l'influence de la potasse.

Afin de démontrer que l'acide chlorhydrique, à une température élevée, produit la même décomposition, j'ai fait quelques expériences :

1° $0^{gr},1$ de caféine en dissolution dans 50 grammes de glycérine et 20 gouttes d'acide chlorhydrique ayant été traité comme l'infusion de café, j'ai obtenu aussitôt des cristaux identiques.

2° Les marcs de café épuisés ne produisent aucune cristallisation.

3° Enfin, pour compléter la démonstration, j'ai répété ces expériences avec un autre corps renfermant de la caféine : j'ai choisi le thé en poudre grossière, et cette fois encore j'ai obtenu la même cristallisation aiguillée. Il est donc bien établi que c'est à la caféine que sont dus ces cristaux. Dès lors, ils deviennent caractéristiques du thé et du café, puisqu'ils sont d'autant plus nombreux que ces substances alimentaires sont plus riches en caféine, et qu'ils disparaissent lorsqu'elles sont livrées au commerce après avoir été épuisées, desséchées et colorées ensuite.

Dans ces expériences, l'infusion et les marcs peuvent servir à l'étude histologique à laquelle MM. Delacroix et Cauvet attachent avec raison une grande importance.

Malgré la valeur des travaux de ces chimistes, il n'est peut-être pas inutile de dire un mot sur cette question. L'aspect et la consistance des marcs doivent être tout d'abord examinés.

Lorsqu'on opère avec la chicorée véritable en semoule,

les marcs sont presque noirs ; ils ont conservé leur forme, mais ils s'écrasent avec la plus grande facilité. Alors ils ont l'aspect et l'odeur du cirage.

En les étendant avec le doigt sur une plaque de marbre couverte de papier blanc, ils ne doivent faire sentir aucun corps dur et résistant; dans le cas contraire, la matière étrangère fait saillie, ce qui permet de l'enlever à l'aide d'une pince et de l'examiner.

Le nombre de ces saillies peut en quelque sorte faire apprécier la qualité de la chicorée.

Quand la chicorée a été préparée avec des matières pulpeuses, celles-ci se désagrégent et forment une pâte après avoir subi l'opération que nous avons décrite.

La couleur et l'odeur du résidu sont les mêmes que celles que présente la chicorée pure.

Les marcs de café sont d'un brun roux; ils conservent l'odeur *sui generis* et la forme primitive; sous pression, ils se compriment sans se réduire en pâte. Lorsqu'ils sont mélangés de chicorée, en les étendant avec le doigt sur le marbre ainsi qu'il a été dit, on les recouvre de matière pulpeuse de la chicorée et l'on détermine autour des marcs de longues traînées d'un noir brun.

L'étude microscopique montre dans la partie liquide de la décoction, outre les aiguilles, des éléments histologiques très-importants pour le thé et le café.

Dans le glycéré de café on voit des cellules allongées, aplaties, terminées en pointe et ponctuées, provenant du tégument argentin qui entoure la graine. Ces cellules, au lieu d'être réunies en masse, ainsi qu'elles sont représentées dans le *Dictionnaire des falsifications* de MM. Chevalier et Baudrimont (*fig.* 5, AA'), sont isolées, ce qui empêche toute confusion.

Leur aspect rappelle celui des diatomées naviculaires, bien qu'elles soient moins transparentes et que leurs lignes soient moins délicates (*fig.* 5, B). A côté de ces cel-

lules, on voit des débris d'autres beaucoup plus larges, mais également ponctuées.

Celles-ci sont représentées en C (*fig.* 5). Ce dessin, je l'espère, empêchera de les confondre avec les vaisseaux rayés de la chicorée, représentés *fig.* 4, A, à côté des différentes cellules B, C, D, E, F et de la matière pulpeuse G, qui caractérisent la chicorée.

On ne trouve que des fragments de ces différents éléments dans la partie liquide de la décoction de chicorée; pour bien les examiner, il faut les rechercher dans le résidu, que l'on délaye dans la glycérine.

Avec la décoction de thé, on remarque également dans la glycérine des fragments de cellules allongées d'un aspect particulier.

On peut les comparer pour la forme et la couleur à des débris de lombric (ascaride lombricoïde) (*fig.* 6, A). A côté de ces cellules on voit de fines trachées (B), des gouttelettes de chlorophylle (C) et des traces de matières colorantes étrangères bleues (K) (indigo ou bleu de Prusse) et brunes (rocou?) (O), même avec les thés des meilleures maisons de commerce.

Le résidu délayé dans la glycérine, outre les cellules allongées que nous avons décrites, laisse voir de nombreuses trachées (BB') et des fibres qui représentent le squelette de la feuille (D) et qui, par conséquent, deviennent caractéristiques.

Ces remarques, s'ajoutant aux données du *Dictionnaire* de MM. Chevalier et Baudrimont, permettront, je l'espère, de découvrir facilement les falsifications que l'on fait subir au café, à la chicorée et au thé.

LÉGENDE DE LA PLANCHE.

(Observations microscopiques; grossissement : 350)

Fig. 1. — A droite, chicorée YP, enduite de beurre fondu. A gauche, chicorée du Nord *x*B, enduite de suif de veau.

Fig. 2. — Cristaux obtenus avec le café pur.



Fig. 1.



Fig. 2.



Fig. 3.



Fig. 4.



Fig. 5.



Fig. 6.

Gravé par P. Méa.

Imp. P. Méa, r. des Chartiers 1, Pa

Fig. 3. — A droite, café mélangé avec le quart de son poids de chicorée xB. A gauche, chicorée renfermant une forte proportion de suif. Dépôt formé cinq à six jours après la réaction. Transformation en acide stéarique.
Fig. 3. — Histologie de la chicorée.
Fig. 5. — Histologie du café.
Fig. 6. — Thé vert. Histologie et microchimie.

DÉTERMINATION DE LA DENSITÉ ET DES COEFFICIENTS DE DILATATION DU CHLORURE DE MÉTHYLE LIQUIDE;

PAR MM. CAMILLE VINCENT ET DELACHANAL.

Nous avons entrepris la détermination de la densité et des coefficients de dilatation du chlorure de méthyle liquide. Le produit avec lequel nous avons opéré a été obtenu par la décomposition pyrogénée du chlorhydrate de triméthylamine, d'après le procédé de M. Vincent; il a été purifié à l'état gazeux par plusieurs passages successifs dans de l'acide chlorhydrique, puis dans de l'eau alcaline, enfin dans de l'acide sulfurique et sur du chlorure de calcium pulvérisé; il a été ensuite liquéfié par refroidissement.

Nous avons suivi, dans ces déterminations, la méthode de M. Isidore Pierre, à l'aide de laquelle ce physicien a déterminé les coefficients de dilatation d'un grand nombre de liquides organiques, et que nous croyons devoir rappeler succinctement.

Cette méthode consiste à construire un thermomètre avec un poids déterminé du liquide dont on veut étudier la dilatation, puis à observer les différents volumes occupés par ce liquide à différentes températures.

L'instrument dont nous nous sommes servis se composait d'un réservoir thermométrique, dont la capacité était d'environ $2^{cc},2$, et auquel était soudée une tige divisée en longueurs représentant des volumes égaux, c'est-à-dire calibrée avec soin et ayant environ $0^{m},70$ de longueur. Les

proportions de notre appareil permettaient au chlorure de méthyle de parcourir la presque totalité de la tige graduée dans les limites de température de nos expériences, comprises entre — 23° et + 40°.

Les déterminations de volume de l'appareil ont été faites au moyen du mercure à la température de zéro et de + 100°. Le volume à zéro du réservoir thermométrique, jusqu'à la naissance de la graduation, est de $2^{cc},23475$, et celui de chacune des divisions de la tige est de $0^{cc},0002687$.

Pour remplir l'appareil de chlorure de méthyle liquide, nous avons procédé de la façon suivante : A l'extrémité de la tige opposée au réservoir, nous avons soudé un tube de 15 millimètres de diamètre environ et de 8 centimètres de longueur, formant entonnoir, et dans lequel nous avons versé du chlorure liquide. Afin d'éviter la condensation de l'humidité de l'air, nous avons fermé aussitôt cet entonnoir à l'aide d'un bouchon portant un long tube ouvert, permettant la sortie du chlorure de méthyle vaporisé. Pour faire pénétrer le liquide dans le réservoir du thermomètre, nous avons plongé ce dernier dans un bain de chlorure de méthyle liquide contenu dans un vase à essais, et nous avons injecté pendant quelques instants de l'air dans ce bain, à l'aide d'une soufflerie, pour en hâter l'évaporation et abaisser ainsi la température du liquide restant. Par suite du refroidissement considérable ainsi obtenu, l'air du réservoir thermométrique, s'étant contracté, a permis à une certaine quantité de chlorure de méthyle d'entrer dans cette capacité. Nous avons alors enlevé l'appareil du bain réfrigérant, et nous l'avons légèrement échauffé; le chlorure de méthyle contenu dans le réservoir, se vaporisant alors, en a chassé tout l'air, qui s'est échappé à travers le chlorure de méthyle liquide contenu dans l'entonnoir supérieur. Lorsque le dégagement gazeux a cessé, nous avons replongé le réservoir dans le bain frigorifique, et aussitôt le gaz chlorure de méthyle, se liquéfiant, a permis au liquide de l'entonnoir de s'y précipiter. L'appareil a été

ainsi rempli jusqu'au niveau que nous avons jugé nécessaire, en refroidissant une partie plus ou moins considérable de la tige. Nous avons alors vidé l'excès de chlorure que contenait encore l'entonnoir; puis, le réservoir étant plongé dans le bain frigorifique, nous avons fermé l'appareil à la lampe.

Le poids de chlorure de méthyle contenu dans l'appareil étant de 2gr,268, nous donnons le Tableau suivant des différents niveaux auxquels il affleurait aux diverses températures de nos expériences, toutes corrections faites :

	Températures.	Divisions.
	°	
1	—23,7	201,1
2	0,0	537,1
3	13,4	772,9
4	17,9	857,1
5	23,8	966,3
6	30,2	1093,0
7	39,0	1278,7

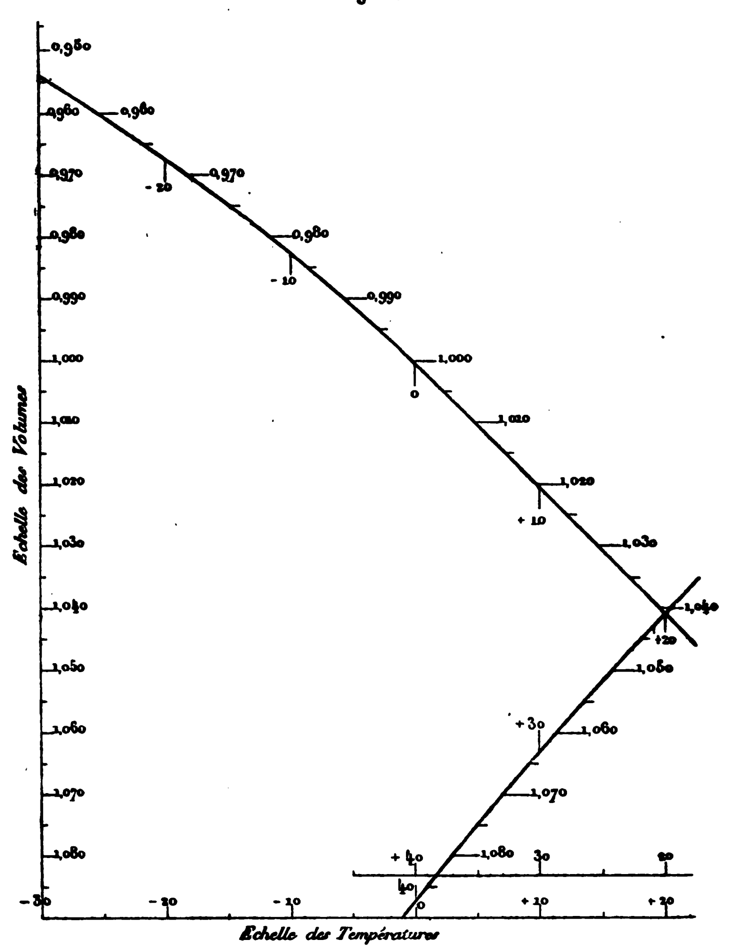
Densité. — Au moyen de ces nombres, nous avons calculé d'abord la densité du chlorure de méthyle à ces températures, et nous avons trouvé les valeurs suivantes :

Températures observées.	Densités trouvées.
°	
—23,7	0,99145
0,0	0,95231
13,4	0,92830
17,9	0,91969
23,8	0,90875
30,2	0,89638
39,0	0,87886

Ces résultats nous ont permis de construire une courbe à l'aide de laquelle nous avons déterminé, de 5 en 5 degrés, les densités du chlorure de méthyle entre —30° et +50°. Nous avons porté les températures en abscisses et les densités en ordonnées; en réunissant par un trait continu

les divers points ainsi déterminés, nous avons obtenu une

Fig. 1.



courbe représentée ci-dessus. A l'aide de cette courbe, nous avons dressé le Tableau suivant :

Températures.	Densités calculées.
— 30°	0,9990
— 25	0,9915

Températures.	Densités calculées.
°	
— 20	0,9831
— 15	0,9760
— 10	0,9688
— 5	0,9606
0	0,9523
+ 5	0,9431
10	0,9339
15	0,9247
20	0,9153
25	0,9058
30	0,8961
35	0,8861
40	0,8758
45	0,8653
50	0,8542

Coefficients de dilatation. — Les expériences précédentes nous ont permis de connaître les volumes du chlorure de méthyle à différentes températures; or, comme ces nombres varient suivant le poids de chlorure de méthyle employé, nous avons cru utile, pour les rendre tous comparables, de prendre pour unité le volume à zéro du produit soumis à l'expérience, et nous avons ainsi dressé le Tableau ci-dessous :

Températures observées.	Volumes observés.	Volumes relatifs en prenant pour unité le volume à zéro.
°	cc	
— 23,9	2,28589	0,96216
0,0	2,37579	1,00000
+ 13,4	2,43892	1,02657
17,9	2,46169	1,03616
23,8	2,49129	1,04862
30,2	2,52587	1,06317
39,0	2,57701	1,08470

Parmi ces observations, nous avons choisi celles faites à 13°,4, à 23°,8 et à 39 degrés pour déterminer les coef-

ficients de dilatation du chlorure de méthyle d'après la formule

$$V_t = V_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3),$$

et nous avons obtenu les valeurs suivantes pour les trois coefficients α, β, γ :

$$\alpha = 0,00193929,$$
$$\beta = 0,00000183121,$$
$$\gamma = 0,0000001059I6.$$

Nous avons calculé, tous les 10 degrés, l'augmentation de volume du chlorure de méthyle soumis à l'expérience pour un degré d'élévation de température depuis — 30° jusqu'à + 40°, afin d'indiquer les variations du coefficient de dilatation à ces différentes températures. Nous avons obtenu les résultats suivants (¹) :

— 30°	$\alpha = 0,001310$
— 20	$\alpha = 0,001458$
— 10	$\alpha = 0,001659$
0	$\alpha = 0,001920$
10	$\alpha = 0,002000$
20	$\alpha = 0,002047$
30	$\alpha = 0,002211$
40	$\alpha = 0,002373$

(¹) α est le rapport de l'augmentation du volume de t à $t + 1$ degré, au volume à $t°$.

SUR LA DÉCOMPOSITION DES HYDRACIDES PAR LES MÉTAUX;

PAR M. BERTHELOT.

---

1. Si l'on dresse la liste des chlorures métalliques rangés dans l'ordre de leurs chaleurs de formation ([1]), on est conduit à des conséquences qui ne s'accordent pas avec l'ancienne classification des métaux, disposés en sections suivant leur aptitude à décomposer l'eau pure et les acides avec dégagement d'hydrogène. D'après cette liste, en effet, la chaleur de formation de l'acide chlorhydrique gazeux depuis ses éléments, soit $+22,0$, est surpassée par la chaleur de formation de tous les chlorures anhydres, même par celle des chlorures de plomb, de cuivre, de mercure et d'argent : l'or seul fait exception parmi les métaux usuels. Tous ces métaux, l'or excepté, devraient donc décomposer le gaz chlorhydrique.

2. On pourrait objecter à cette conclusion que l'hydrogène et l'acide chlorhydrique, substances gazeuses, n'ont pas le même état physique que le métal et son chlorure, substances solides. Il faudrait donc, pour rendre les produits vraiment comparables aux corps primitifs, soit ajouter à la chaleur de formation de l'acide chlorhydrique la différence entre la chaleur de solidification de ce gaz et celle de l'hydrogène, ce qui ramènerait tout à l'état solide; soit retrancher de la chaleur de formation du chlorure métallique la différence entre la chaleur de vaporisation du chlorure et celle du métal, ce qui ramènerait tout à l'état gazeux.

Les données exactes de ces calculs nous font défaut; mais, d'après les analogies, l'une ou l'autre de ces diffé-

---

([1]) *Annuaire du Bureau des Longitudes* pour 1879, p. 540 et suiv.

rences entre deux quantités du même ordre ne saurait représenter un nombre bien considérable (soit 3 ou 4 Calories, pour fixer les idées). Or les chaleurs de formation des chlorures alcalins et terreux, comme celles des chlorures des métaux du groupe du fer, de zinc, de cadmium, d'étain, pris dans l'état solide, sont comprises entre 105 et 40 Calories. Les chaleurs mêmes de formation du chlorure plombique (+ 41,4), du chlorure cuivreux (+ 33,1), du chlorure mercureux (+ 40,9), du chlorure argentique (+ 29,2), surpassent notablement celle de l'acide chlorhydrique (+ 22,0). Celles des chlorures palladeux (26,3) et platineux (+ 22,6), formés en présence du chlorure de potassium, seraient l'une à la limite, l'autre moindre, en tenant compte à la fois de la correction précédente, et de cette circonstance que les chiffres qui les concernent comprennent, en surplus, la chaleur de formation du chlorure double.

3. D'après ces données, le gaz chlorhydrique, je le répète, doit être décomposé avec dégagement d'hydrogène par tous les métaux, à l'exception de l'or, du platine et probablement du palladium.

Le fait est bien connu pour les métaux que l'on rangeait autrefois dans les trois premières sections. Quant au plomb, Berzélius indiquait déjà sa réaction sur l'acide chlorhydrique; elle est facile à vérifier, même à froid, avec l'acide concentré, c'est-à-dire renfermant une certaine dose d'hydracide anhydre. Il en est de même du cuivre, quoique l'action soit plus lente; elle a été signalée par divers auteurs et je l'ai vérifiée à bien des reprises depuis vingt ans, toutes les fois que j'ai conservé, en présence du cuivre, les solutions acides de chlorure cuivreux destinées à absorber l'oxyde de carbone.

4. Entre le mercure et le gaz chlorhydrique, il n'y a pas d'action à la température ordinaire; mais, comme il arrive souvent en Chimie, c'est une question de température. Pour

le vérifier, j'ai rempli de gaz chlorhydrique pur et sec un tube de verre dur, j'ai ajouté un globule de mercure ; j'ai scellé le tube à la lampe, je l'ai entouré d'une toile métallique et je l'ai chauffé dans mes appareils ordinaires. L'attaque n'a lieu ni à 200 degrés, comme je l'avais vu autrefois, ni à 340, ni même à 400, mais vers 550 à 600 degrés ; au bout de quelques heures de chauffe, la réaction devient appréciable : elle donne naissance à une trace de chlorure mercureux cristallisé (noircissant au contact de la potasse), ainsi qu'à de l'hydrogène en très-petite quantité ($0^{cc},1$ avec 50 centimètres cubes de HCl), gaz que j'ai réussi cependant à isoler et à caractériser. Une dose si faible, produite à un point si voisin du ramollissement du verre, rend l'expérience fort délicate à reproduire.

L'expérience suivante est plus nette et tout à fait décisive : $13^{gr},5$ de mercure et 48 centimètres cubes de gaz chlorhydrique purs, soit $30\,Hg^2 + HCl$, placés dans un tube de verre scellé très-résistant et chauffés à la température la plus haute possible (vers 550 degrés) pendant une heure, ont fourni un peu plus de 1 centimètre cube d'hydrogène : ce qui fait environ $\frac{1}{20}$ du gaz chlorhydrique décomposé dans ces conditions.

On obtient un résultat plus facile à reproduire en faisant passer le gaz chlorhydrique sec, chargé de vapeur de mercure, à travers un tube de porcelaine chauffé à une température que j'évalue entre 800 et 1000 degrés. Dans les conditions où j'opérais, il se dégageait une dose sensible d'hydrogène, soit près d'un demi-centimètre cube par minute, et cela indéfiniment, en même temps qu'il se condensait du chlorure mercureux à l'extrémité froide du tube. Dans des conditions identiques d'ailleurs, l'acide chlorhydrique n'a fourni aucun indice du dissociation, aucune trace d'hydrogène, même au bout de dix minutes.

La décomposition de l'acide chlorhydrique par le mercure n'est donc pas douteuse. Cette réaction prouve, pour le dire

en passant, que le chlorure mercureux existe réellement dans l'état gazeux, à une température voisine de 800 degrés.

Cependant la réaction demeure fort incomplète, la majeure partie du gaz chlorhydrique subsistant en présence d'un excès de mercure : sans aucun doute à cause de l'état de dissociation partielle du chlorure mercureux en ses éléments; d'où il résulte du chlore libre, qui s'unit à l'hydrogène et limite la réaction. Celle-ci n'en conserve pas moins sa signification au point de vue thermochimique, attendu que le gaz chlorhydrique ne donne aucun signe de dissociation, même vers 800 degrés.

Au contraire, l'état de dissociation du chlorure mercureux rend possible et même inévitable la réaction inverse, c'est-à-dire la régénération de l'acide chlorhydrique, au moyen de l'hydrogène libre et du chlorure mercureux. Je l'ai vérifiée dans un tube scellé à la lampe, et dans des conditions pareilles aux précédentes. La réaction commence même à une température plus basse, et l'on en observe quelques indices dès 340 degrés. Mais, dans tous les cas, cette réaction inverse est demeurée incomplète, ainsi qu'on devait s'y attendre.

5. Nous observons ici les deux réactions contraires, comme dans une multitude de cas analogues, c'est-à-dire dans ces conditions de dissociation, dont nous devons la connaissance aux beaux travaux de M. H. Sainte-Claire Deville. Il suffirait d'éliminer les produits ou de faire intervenir un excès, sans cesse renouvelé, de l'un des composants, pour que la réaction devînt totale, soit dans un sens, soit dans l'autre; c'est-à-dire pour que le mercure décomposât complétement une dose donnée d'acide chlorhydrique, ou pour que l'hydrogène décomposât complétement une dose donnée de chlorure mercureux. Autrefois on expliquait ces réactions inverses, si fréquentes dans la réaction de l'hydrogène sur les chlorures, oxydes, sulfures métalliques, par les conditions de masses rela-

tives. Mais cette condition est insuffisante ; il faut en faire intervenir une autre, dont j'ai établi la nécessité par mes recherches thermochimiques. Les réactions chimiques, en effet, ne s'effectuent directement que si elles dégagent de la chaleur, les conditions et les états des corps étant supposés comparables.

Quand tous les produits d'une réaction sont stables, dans des conditions données, la réaction s'opère suivant un sens unique, réglé par son signe thermique, sans qu'il y ait ni partage ni possibilité de réaction inverse. La condition fondamentale qui doit être remplie d'une manière nécessaire pour que le partage et les réactions inverses, déterminées par la grandeur des masses relatives, deviennent possibles, est la suivante : il faut que l'un des produits soit en partie décomposé, soit par une dissociation proprement dite, s'il s'agit de composés anhydres binaires ou analogues, soit par un équilibre entre quatre substances antagonistes, comme il arrive pour les éthers et pour les sels dissous. Cette condition étant réalisée, *les deux actions inverses sont possibles, parce qu'elles s'effectuent toutes deux avec dégagement de chaleur;* ce qui est praticable, attendu qu'elles n'ont pas le même point de départ. Par exemple, d'une part, le mercure décompose l'acide chlorhydrique et forme du chlorure mercureux et de l'hydrogène, avec dégagement de chaleur, en vertu des nombres cités plus haut. Mais, d'autre part, le chlorure mercureux étant décomposé partiellement par la chaleur, son chlore, devenu libre, pourra réagir sur l'hydrogène libre pour régénérer l'acide chlorhydrique, toujours avec dégagement de chaleur. On voit clairement ici le rôle distinct de l'énergie étrangère développée par l'échauffement, et le rôle des énergies chimiques développées par la réaction des corps mis en présence. Les mêmes principes s'appliquent aux autres expériences que je vais résumer.

6. L'argent pur et le gaz chlorhydrique pur, chauffés vers

500 à 550 degrés, réagissent avec formation d'hydrogène et d'un sous-chlorure, qui recouvre comme d'un vernis la surface de l'argent.

Notre respecté confrère M. Boussingault a observé, il y a bien des années, cette décomposition du gaz chlorhydrique par l'argent ([1]); mais il opérait à la température du rouge vif, c'est-à-dire dans des conditions où la dissociation, ignorée à cette époque, du gaz chlorhydrique pourrait intervenir dans le phénomène. Il n'en est pas de même dans mon expérience, le gaz chlorhydrique étant stable à 500 et même à 800 degrés.

Cependant, j'ai observé que la réaction est limitée par la réaction inverse, le chlorure d'argent sec étant réduit en grande partie par l'hydrogène, avec formation d'acide chlorhydrique, dans les mêmes conditions expérimentales : ce qui est conforme à l'observation courante des chimistes. Il y a encore ici quelque phénomène de dissociation du chlorure d'argent, analogue à celle du chlorure de mercure, et donnant lieu, par exemple, à du chlorure argenteux, Ag^2Cl, à du chlore libre et à du chlorure argentique, entre lesquels se produirait un certain équilibre. Mais je n'insiste pas. L'existence du chlorure argenteux paraît établie par Rose; mais sa chaleur de formation nous est inconnue.

7. Le palladium n'a pas décomposé le gaz chlorhydrique vers 550 degrés, et le platine pas davantage : faits qui s'expliquent à la fois par l'infériorité des chaleurs de formation de leurs chlorures et surtout par le défaut de stabilité de ces corps, lesquels n'existent plus à la température nécessaire pour provoquer la réaction entre le gaz chlorhydrique et les autres métaux nobles.

8. Telles sont mes observations sur la réaction entre l'acide chlorhydrique gazeux et les métaux. Si nous examinons maintenant ce qui se passe en présence de l'eau,

---

([1]) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. LIV, p. 260; 1833.

c'est-à-dire avec l'acide chlorhydrique dissous, il faudra faire intervenir les nouvelles combinaisons résultant de l'action de l'eau, comme je l'ai établi ailleurs par une discussion détaillée [1]; c'est-à-dire les hydrates définis et stables formés par l'acide chlorhydrique d'une part, par les chlorures métalliques de l'autre.

Quand l'acide chlorhydrique se trouve dissous dans une quantité d'eau suffisante pour former un hydrate stable et tel que l'hydracide n'offre plus une tension sensible, les chaleurs de formation réunies de l'acide chlorhydrique et de son hydrate donnent une valeur voisine de $+ 39^{Cal}$, valeur [2] surpassée par la chaleur de formation des chlorures hydratés des métaux alcalins terreux, des métaux du groupe du fer, du zinc, du cadmium, etc. Le plomb et l'étain sont à la limite; les chlorures d'argent, le cuivre, le mercure, fournissent des valeurs bien moindres. Ces relations thermiques sont d'accord avec les faits connus relativement à l'attaque des métaux par l'acide chlorhydrique froid et étendu.

Mais, si la quantité d'eau est moindre ou la température plus haute, la liqueur pourra renfermer de l'acide anhydre, intervenant avec sa chaleur de formation propre; car il possède en plus l'énergie perdue dans la formation de l'hydrate chlorhydrique. On comprend dès lors l'attaque du plomb et du cuivre par l'acide chlorhydrique concentré. Quant au mercure et à l'argent, cette attaque n'a pas lieu à froid par l'hydracide, et elle exige le concours d'un certain échauffement, au même titre que l'union de l'oxygène avec l'hydrogène, et un grand nombre de réactions analogues.

On retrouve donc ici, d'une manière générale, la

---

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 5e série, t. IV, p. 460 et 488.

(2) Il conviendrait en outre de tenir compte du changement d'état de l'hydrogène et de tout ramener à l'état solide, ainsi qu'il a été dit plus haut.

conformité des résultats observés avec les théories thermiques.

9. La théorie indique, et l'expérience confirme, des réactions analogues pour le gaz sulfhydrique. J'ai vérifié notamment qu'il est décomposé vers 550 degrés par l'argent et par le mercure, avec formation de sulfure métallique et d'hydrogène, fort abondant avec l'argent, en petite quantité avec le mercure. Mais les réactions inverses se produisent également, les sulfures d'argent et de mercure secs fournissant avec l'hydrogène pur de l'hydrogène sulfuré et du métal, vers 550 degrés. Cette réciprocité tient à l'état de dissociation, tant des sulfures métalliques que de l'hydrogène sulfuré lui-même, à la température des expériences. En effet, j'ai constaté, vers 550 degrés, que l'hydrogène sulfuré donne un peu de soufre et d'hydrogène libres.

Le cuivre en excès décompose complétement l'hydrogène sulfuré gazeux à 500 degrés. Même à froid, il attaque lentement le gaz sec, avec formation d'hydrogène. A 100 degrés, ce dégagement d'hydrogène est assez rapide pour donner lieu à une expérience de cours. La réaction inverse (sulfure de cuivre et hydrogène) a lieu à 550 degrés; elle s'explique par la dissociation des sulfures de cuivre.

L'expérience ne réussit bien qu'avec le gaz et le cuivre secs. Si l'hydrogène sulfuré est dissous dans l'eau, le cuivre s'altère superficiellement et l'attaque s'arrête; de telle façon que la dose d'hydrogène mis en liberté est à peu près insensible.

Le zinc et le fer donnent également des indices de réaction, mais qui s'arrêtent aussitôt, comme si les traces de sulfure produites formaient aussitôt vernis à la surface du métal. Avec l'argent à 100 degrés, le même effet semble se produire, à en juger par le changement de teinte du métal; mais l'attaque est, en somme, insensible.

Ces faits montrent que les divers métaux semblent se comporter de la même manière, c'est-à-dire attaquer l'hydrogène sulfuré soit à froid, soit à 100 degrés. Mais la réaction, étant arrêtée par l'absence de contact, ne peut être manifestée à ces températures d'une manière vraiment démonstrative qu'avec le cuivre.

10. La conformité entre la théorie et l'expérience est plus frappante encore dans les réactions opérées sur des métaux par les acides bromhydrique et iodhydrique. Non-seulement les métaux alcalins, les métaux terreux et ceux du groupe du fer et congénères attaquent à froid ces deux hydracides avec dégagement d'hydrogène, conformément aux valeurs thermiques ([1]) :

H + I gaz..	— 0,8	H + Br gaz.	+ 13,5
M + I gaz..	de + 85 à + 28	M + Br gaz.	de + 100 à + 42 ;

mais l'écart entre les chaleurs de formation des deux hydracides et celles de bromures et iodures métalliques correspondants demeure bien plus grand pour le plomb, le cuivre, l'argent et le mercure, que dans le cas de l'acide chlorhydrique comparé aux chlorures.

Pb + Br gaz......	+ 38,5	Pb + I gaz......	+ 26,4
Cu^2 + Br gaz.....	+ 30,0	Cu^2 + I gaz......	+ 21,9
Hg^2 + Br gaz......	+ 39,2	Hg^2 + I gaz......	+ 29,2
Ag + Br gaz......	+ 27,7	Ag + I gaz......	+ 19,7

La décomposition des acides bromhydrique et iodhydrique par ces métaux doit donc être plus prompte et plus facile que celle de l'acide chlorhydrique. C'est ce que l'expérience vérifie.

On sait comment le gaz iodhydrique attaque à froid le

([1]) Il y aurait en outre à tenir compte des changements d'états, conformément à ce qui a été dit pour l'acide chlorhydrique; mais les résultats généraux sont trop caractérisés pour être affectés par cette correction.

mercure; M. H. Sainte-Claire Deville a vérifié une réaction semblable sur l'argent.

J'ai constaté, il y a bien des années, que l'acide bromhydrique est décomposé lentement et en totalité à froid par le mercure, avec dégagement d'hydrogène. Je viens de vérifier qu'il en est de même pour l'argent, soit avec le gaz bromhydrique, soit avec une solution saturée de cet hydracide; cette dernière agit d'autant mieux qu'elle dissout le bromure d'argent formé. Aussi produit-elle avec l'argent un dégagement assez rapide d'hydrogène.

Le bromure d'argent, au contraire, n'est attaqué par l'hydrogène que très-incomplétement à 550 degrés; et l'iodure d'argent résiste totalement, ou à peu près, toujours dans des tubes scellés.

D'après l'ensemble de ces observations, la théorie thermique se trouve confirmée par la réalité des réactions qu'elle permet de prévoir.

SUR LES DÉPLACEMENTS RÉCIPROQUES ENTRE L'OXYGÈNE, LE SOUFRE ET LES ÉLÉMENTS HALOGÈNES, COMBINÉS AVEC L'HYDROGÈNE;

Par M. BERTHELOT.

1. Les déplacements réciproques entre l'oxygène, le chlore, le brome, l'iode, unis soit aux métaux, soit aux métalloïdes, sont réglés par le signe des chaleurs de combinaison, comme je l'ai établi dans des Recherches publiées il y a quelque temps (*voir* ce Recueil, 5e série, t. XV, p. 485). L'hydrogène seul et ses composés ne figuraient pas dans ces Recherches : j'ai cru devoir en faire une étude spéciale.

2. Donnons d'abord le tableau des quantités de chaleur :

H + Cl	= HCl gaz...	+ 22,0	HCl dissous...	+ 39,3
H + Br gaz	= HBr gaz. .	+ 13,5	HBr dissous...	+ 33,5
H + I gaz	= HI gaz....	— 0,8	HI dissous....	+ 18,6
H + S gaz	= HS gaz....	+ 3,6	HS dissous....	+ 5,9
H + O gaz	= HO gaz....	+ 29,5	HO liquide....	+ 34,5

3. D'après ces nombres :

1° *Le chlore doit déplacer le brome et l'iode, et le brome doit déplacer l'iode,* tant dans les hydracides gazeux que dans les hydracides combinés avec l'eau : ce qui est conforme à l'expérience courante.

2° *Le chlore et le brome doivent déplacer le soufre* dans l'hydrogène sulfuré, soit gazeux, soit dissous : ce que l'expérience vérifie. La réaction s'effectue d'autant mieux qu'un excès de chlore forme avec le soufre mis en liberté du chlorure de soufre, à l'état anhydre, et divers composés secondaires, en présence de l'eau.

3° *L'iode doit déplacer le soufre dans l'hydrogène sulfuré dissous,* avec formation d'acide iodhydrique étendu ; mais *le soufre doit au contraire décomposer l'acide iodhydrique gazeux,* avec formation d'hydrogène sulfuré gazeux : double conséquence conforme aux faits connus. J'ai exécuté quelques expériences nouvelles sur ce point.

Le gaz sulfhydrique sec étant introduit dans un tube qui contient un peu d'iode, le tube scellé, puis chauffé vers 500 degrés, aucune action sensible ne se développe. Le tube, ouvert après refroidissement, ne renferme pas d'acide iodhydrique ; un peu d'eau développe la réaction.

Le gaz iodhydrique sec, au contraire, mis en présence du soufre, réagit aussitôt, même à froid. Après quelques heures de contact à froid, ou quelques minutes, soit à 100 degrés, soit à 500 degrés, il s'est formé un composé

spécial. Le tube ouvert sur l'eau donne lieu aussitôt à une diminution de moitié environ du volume gazeux, conformément à la relation

$$HI + S^{n+1} = HS + IS^{n}.$$

L'eau s'élève d'abord dans le tube, en demeurant transparente. Mais, parvenue à la moitié de la hauteur, elle commence à se troubler et à blanchir, par suite de la réaction inverse; l'hydrogène sulfuré est décomposé à son tour par l'iode (ou plutôt par l'iodure de soufre), en reproduisant du soufre et de l'acide iodhydrique dissous. C'est une jolie expérience de cours. Le soufre régénéré dans ces conditions renferme une grande quantité de soufre modifié et insoluble.

Les deux actions inverses peuvent être exécutées même en présence de l'eau, prise en proportion convenable; l'acide iodhydrique saturé étant attaqué par le soufre, le gaz sulfhydrique au contraire n'agissant pas sur l'iode, si la liqueur renferme plus de 52 centièmes d'hydracide; tandis qu'il est détruit nettement, si elle en contient moins de 20 centièmes. Entre ces deux limites il se forme des composés spéciaux (*Annales de Chimie et de Physique*, 5e série, t. IV, p. 497).

4° *L'oxygène doit déplacer le soufre dans l'hydrogène sulfuré,* soit gazeux, soit dissous. En présence d'un excès d'oxygène, il se forme à chaud de l'acide sulfureux, ce qui augmente la chaleur produite. Ces réactions sont trop connues pour y insister.

5° *Entre le chlore et l'oxygène,* au contraire, la théorie thermique indique qu'*il doit se produire des équilibres :* d'une part, le chlore gazeux doit décomposer l'eau, lorsqu'il se forme de l'acide chlorhydrique hydraté; car

$$Cl + (n+1)HO = O + (HCl + nHO) \text{ dégage} \ldots\ldots \quad +4,8.$$

D'autre part, l'oxygène gazeux doit décomposer le gaz

chlorhydrique anhydre, avec formation d'eau et de chlore, car

$$O + HCl = Cl + HO \text{ gaz dégage} \ldots \quad +7,5.$$

Ces deux réactions inverses peuvent, en effet, être vérifiées, mais suivant des conditions qui ne sont pas exactement réciproques, et sans jamais devenir complètes, soit dans un sens, soit dans l'autre. Citons des expériences.

I. Un mélange gazeux, fait à équivalents égaux, $HCl + O$, renfermé dans un tube scellé pourvu de deux pôles métalliques et traversé par une série d'étincelles pendant plusieurs heures, s'est décomposé aux $\frac{9}{10}$, avec formation d'eau et de chlore libre.

II. Inversement, le système équivalent, $Cl + HO$ (pesée), traité de la même manière, n'a éprouvé qu'une décomposition limitée, un dixième d'équivalent d'oxygène, à peu près, étant devenu libre.

III. On peut objecter l'action propre de l'électricité et la dissociation des deux composés. J'ai reproduit l'expérience par la chaleur seule et au-dessous de 1000 degrés, ce qui exclut la dissociation du gaz chlorhydrique (mais non celle de l'eau). A 500 degrés, en tube scellé, l'oxygène n'agit pas sur le gaz chlorhydrique. Mais ces deux gaz, mélangés et dirigés à travers un tube de porcelaine rougi, ont fourni du chlore libre et de l'eau. La réaction a donc lieu; mais elle demeure incomplète, à cause de la dissociation de la vapeur d'eau et surtout à cause de la réaction inverse développée à plus basse température.

IV. En effet, l'action du chlore sur l'eau a lieu dès la température ordinaire, même en l'absence de la lumière solaire ([1]), l'oxygène produit demeurant alors uni au chlore, pour former divers oxacides peu stables. A 100 degrés, j'ai obtenu quelque dose d'oxygène libre (en tube

---

([1]) *Voir* mes observations *Annales de Chimie et de Physique*, 5e série, t. V, p. 323.

scellé). La réaction est mieux caractérisée, soit à 550 degrés dans un tube scellé, ce qui m'a fourni, par exemple, les rapports suivants :

$$4Cl + 12HO = HCl + O + 3Cl + 11HO;$$

soit au rouge, le chlore étant mêlé de vapeur d'eau et dirigé à travers un tube de porcelaine.

Ainsi, d'une part, l'oxygène attaque l'acide chlorhydrique au rouge, température à laquelle les hydrates chlorhydriques n'existent plus : la réaction est donc exothermique ; mais la dissociation de l'eau empêche la réaction de devenir totale. D'autre part, le chlore agit déjà à froid, à 100 degrés et dans des conditions de tubes scellés où il est permis d'admettre l'existence des hydrates chlorhydriques, soit à l'état stable, soit à l'état dissocié : la réaction est donc encore exothermique ; mais elle ne peut pas davantage devenir totale, tant à chaud, à cause de la dissociation de ces hydrates, qu'à froid, à cause de la persistance d'une certaine proportion d'eau nécessaire à leur formation ([1]).

Les résultats sont plus simples avec les acides bromhydrique et iodhydrique. En effet :

6° *L'oxygène doit déplacer le brome dans l'acide bromhydrique,* soit gazeux, soit dissous, d'après les valeurs thermiques.

En fait, le mélange à équivalents égaux, HBr + O (avec un léger excès d'oxygène), chauffé vers 500 à 550 degrés pendant dix heures, se change entièrement en brome libre et eau, HO + Br. Une heure ne suffit pas pour accomplir cette réaction ; elle n'a lieu ni à froid, même au soleil, ni à 100 degrés (six heures). J'ai observé d'ailleurs que le gaz bromhydrique pur et exempt de toute trace d'air ne donne,

---

([1]) Sans parler des complications secondaires introduites à froid par la formation des oxacides du chlore.

vers 500 degrés, que des indices douteux de dissociation.

Le brome et l'eau, HO + Br, pesés à équivalents égaux, dans des ampoules placées dans un tube vide, que l'on scelle avant de les briser, n'ont point réagi ni produit d'oxygène, à 550 degrés.

7° *L'oxygène doit déplacer l'iode dans l'acide iodhydrique* soit gazeux, soit dissous, d'après les valeurs thermiques. En fait, le mélange de 4 volumes de gaz iodhydrique et de 1 volume d'oxygène prend feu au contact d'une allumette et brûle avec une flamme rouge :

$$HI + O = HO + I.$$

C'est là une expérience de cours.

Ce même mélange, exposé au soleil, se décompose lentement. A 100 degrés, la réaction a lieu; mais elle n'est pas complète au bout de quinze heures. A 500 degrés, au contraire, elle est totale en peu de temps. Quand l'acide iodhydrique est dissous, on sait avec quelle promptitude il se colore avec mise en liberté d'iode, sous l'influence de l'air.

Inversement, l'iode et l'eau, placés dans un tube vide en proportions équivalentes, I + HO, ne réagissent ni à 100 degrés, ni à 500 degrés [1].

L'ensemble de ces résultats vérifie complétement la théorie thermique, et en précise les applications à la Statique chimique.

DÉPLACEMENTS RÉCIPROQUES ENTRE LES ACIDES FAIBLES;

PAR M. BERTHELOT.

1. Les déplacements réciproques entre les acides, unis à une même base, sont réglés par le signe thermique de la

[1] A 500 degrés, il se produit une trace d'iodure alcalin, due à l'attaque du verre.

réaction, calculée pour les corps séparés de l'eau : il en est ainsi, dis-je, toutes les fois que chaque acide forme avec la base un sel unique, non décomposable par l'eau en tout ou en partie. Au contraire, il y a partage toutes les fois que l'acide qui dégage le plus de chaleur en s'unissant à la base forme avec celle-ci soit un sel acide partiellement et progressivement décomposable par le dissolvant, soit même un sel neutre, décomposable d'une façon analogue, ce qui est le cas des acides faibles. J'ai établi ces règles par de nombreuses expériences ([1]); je vais en faire de nouvelles applications. Il s'agit du partage d'une base alcaline entre deux acides faibles, tels que les acides cyanhydrique, borique, phénique, sulfhydrique et carbonique.

2. Rappelons d'abord les quantités de chaleur, N, dégagées par l'union de la potasse étendue avec divers acides :

KO étendue	+ HCy étendu dégage....	+ 3,0
»	+ H^2S^2 étendu..........	+ 7,7
»	+ $C^{12}H^6O^2$ étendu......	+ 7,8
»	+ BO^3 étendu..........	+ 10,0
»	+ C^2O^4 étendu.........	+ 11,0
KO étendue	+ HCl étendu..........	+ 13,7
»	+ AzO^6H étendu......	+ 13,8
»	+ $C^4H^4O^4$ étendu.......	+ 13,3

Les cinq premiers acides sont déplacés de leur union avec les alcalis, en totalité, ou sensiblement, par les trois derniers; comme le montrent les expériences que j'ai publiées précédemment.

3. Opposons maintenant les acides faibles les uns aux autres. J'ai trouvé, à 17 degrés :

([1]) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XXX, p. 546; même vol., p. 145; t. XXIX, p. 503, etc.

1° *Acides cyanhydrique et borique :*

$CyK\ (1^{éq} = 4^{lit}) + BO^3(1^{éq} = 3^{lit})$..	$+4,2$	$N - N_1 = 7,1$
$BO^4K(1^{éq} = 4^{lit}) + CyH(1^{éq} = 2^{lit})$..	$-2,9$	Calculé.. 7,0

Il y a partage; ce partage est attesté dans un cas par un dégagement de chaleur, dans le cas réciproque par une absorption : ce qui est une conséquence de la décomposition partielle des sels mis en jeu sous l'influence de l'eau.

2° *Acides cyanhydrique et phénique :*

$K\ (1^{éq} = 4^{lit}) + C^{12}H^6O^2(1^{éq} = 2^{lit})$..	$+1,4$	$N - N_1 = 4,85$
$H^5KO^2(1^{éq} = 4^{lit}) + CyH(1^{éq} = 2^{lit})$..	$-3,45$	Calculé.. 4,8

Il y a partage, à peu près suivant les rapports 2 : 5; la dilution d'ailleurs ne produit ici, sur chacun des sels pris isolément, que des effets peu sensibles.

3° *Acides phénique et borique :*

$H^5KO^2(1^{éq} = 4^{lit}) + BO^3(1^{éq} = 2^{lit})$....	$+2,2$	$N - N_1 = 2,3$
$O^4K\ (1^{éq} = 4^{lit}) + C^{12}H^6O^2(1^{éq} = 2^{lit})$....	$-0,1$	Calculé.. 2,2

Le partage est ici très-faible, l'acide borique déplaçant à peu près entièrement l'acide phénique.

4° *Acides sulfhydrique et carbonique :*

$H^2S^2(1^{éq} = 32^{lit}) + C^2O^4KO,HO(1^{éq} = 4^{lit})$......	$-2,9$
$H^2S^2(1^{éq} = 32^{lit}) + 2\frac{2}{3}C^2O^4KO,HO(1^{éq} = 4^{lit})$......	$-3,4$

Le déplacement total répond à —3,3; on voit que l'acide sulfhydrique, en présence d'un excès de bicarbonate, se sature presque complétement. A équivalents égaux, il prend à peu près les $\frac{7}{8}$ de la base. Ce partage étant démontré, on conçoit comment un excès de gaz carbonique chasse complétement l'acide sulfhydrique combiné dans les sulfures dissous, et comment un excès de gaz sulfhydrique chasse au contraire complétement l'acide carbonique des carbonates dissous.

En résumé, deux acides faibles opposés l'un à l'autre se

partagent la base, le partage étant réglé par l'état de décomposition partielle des deux sels dissous, lequel dépend à la fois de la proportion d'eau et de celle de l'acide correspondant. Lorsque l'on met un sel d'un tel acide en présence d'un acide antagoniste, sa décomposition par l'eau se reproduit à mesure que la dose de base libre existant dans la liqueur est saturée par l'autre acide, et cela jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre les deux sels et l'eau qui tend à décomposer chacun d'eux. L'effet thermique total est donc la résultante de deux phénomènes, savoir : un dégagement de chaleur, dû à la combinaison de l'acide avec la base libre (énergie chimique), et une absorption de chaleur, due à la décomposition produite par le dissolvant. Cette résultante est, en général [mais non toujours (1)], de signe contraire pour les deux actions inverses.

SUR LA TRANSFORMATION DU SUCRE EN ALCOOL PAR VOIE PUREMENT CHIMIQUE;

Par M. BERTHELOT.

Voici une expérience nouvelle qui, si elle ne résout pas la question de la transformation du sucre en alcool par des agents inorganiques, semble cependant de nature à y apporter quelque lumière. Rappelons l'hypothèse dont il m'a paru intéressant de suivre les conséquences. Supposons que l'action du ferment consiste à dédoubler le sucre en deux produits complémentaires, l'un plus oxygéné, l'autre plus hydrogéné, mode de dédoublement dont la réaction de la potasse sur les aldéhydes (corps comparables au glu-

(1) Voir mes *Recherches sur les acides gras* (*Ann. de Chim. et de Phys.*, 5e série, t. VI, p. 348).

cose) nous fournit précisément l'exemple; ces deux produits exerceraient ensuite une action réciproque. Mais, l'énergie consommée dans le premier dédoublement ne pouvant être reproduite, on ne saurait régénérer le sucre primitif. Dès lors, en son lieu et place, apparaîtront les produits d'une décomposition nouvelle et plus profonde, tels que l'alcool et l'acide carbonique.

J'ai cherché à réaliser ces conditions d'hydrogénation et d'oxydation simultanées du sucre par l'artifice suivant. J'ai disposé une pile de 6 à 8 éléments Bunsen, dont les deux pôles étaient en relation avec un commutateur oscillant, de façon à rendre tour à tour positifs et négatifs, douze à quinze fois par seconde, deux cylindres de mousse de platine jouant le rôle d'électrodes. Cet appareil, plongé dans de l'eau acidulée, développe, à chacun des deux pôles, tour à tour de l'hydrogène et de l'oxygène. En réglant convenablement l'appareil, aucun gaz ne se dégage, l'eau s'y reformant incessamment aussitôt après sa décomposition. C'est cet appareil, ainsi réglé, que j'ai plongé dans des solutions aqueuses de glucose, tantôt neutres, tantôt légèrement acides ou alcalines : j'espérais provoquer le dédoublement du sucre.

J'ai obtenu, en effet, de l'alcool, mais en très-petite quantité (quelques millièmes), la majeure partie du glucose ayant résisté.

Une transformation aussi limitée n'autorise pas de conclusion définitive, car la limite peut résulter aussi bien de l'inexactitude de l'hypothèse fondamentale que de l'imperfection des conditions destinées à la réaliser : cependant le fait seul d'une production d'alcool, réalisée à froid et au moyen du sucre soumis à l'influence de l'électrolyse, m'a paru digne d'être connu.

MÉMOIRE SUR LE FER NATIF DU GROENLAND ET SUR LA DOLÉRITE QUI LE RENFERME;

PAR M. LAWRENCE SMITH,
de Louisville (Kentucky).

---

1. Ce Mémoire a pour but de coordonner les faits relatifs à l'une des découvertes lithologiques les plus remarquables concernant les masses éruptives de notre globe. Il s'agit de l'existence du fer natif, en très-grande proportion, dans la masse même de roches doléritiques, et ce fait est si remarquable, que l'on a été porté à rechercher pour lui une explication extraordinaire et à l'attribuer à une cause cosmique ou, en d'autres termes, à l'arrivée dans une roche terrestre de matériaux météoritiques. Tout d'abord, mon intention était de donner purement et simplement les résultats de mes propres recherches; mais bientôt je reconnus que, si je ne montrais pas leurs rapports et leurs différences avec les notions acquises déjà, ils n'apporteraient pas beaucoup de progrès dans l'opinion des naturalistes.

Les dolérites à fer natif qui vont être étudiées ici ont fixé déjà, en effet, l'attention du monde savant, et beaucoup d'écrits à leur égard ont été publiés par des observateurs distingués, parmi lesquels je citerai MM. Nordenskjöld, auteur de la découverte, Gustave Nauchkoff et G. Lindström (de Stockholm), Johnstrup et Steenstrup (de Copenhague), Tschermak (de Vienne), Daubrée (de Paris) et Wöhler (de Göttingen). Tous, sauf MM. Johnstrup et Steenstrup, ont considéré le métal comme ayant une ori-

gine météoritique. M. Daubrée, cependant, a exprimé à cet égard des doutes bien motivés ([1]).

Déjà peu de temps après la découverte de M. Nordenskjöld, je fis du fer natif et de la dolérite à laquelle il est associé un examen sommaire, qui me conduisit immédiatement à reconnaître que le métal est certainement d'origine terrestre, et représente l'un des constituants naturels de la roche pyroxénique dont il fait partie ([2]). J'annonçai cette conclusion à plusieurs des savants avec lesquels j'entretiens une correspondance, mais je n'en fis pas le sujet d'une publication, désirant la soumettre à des vérifications ultérieures.

M. Nordenskjöld me procura 50 kilogrammes de débris de fer conservés jusque-là dans le Musée royal de Stockholm et plusieurs kilogrammes des échantillons originaux sur lesquels avaient été faites ses propres observations, ainsi que celles de M. Lindström. Je dois aussi à M. Johnstrup des échantillons appartenant au Musée royal de Copenhague, comprenant toutes les variétés des masses volumineuses qui ne se sont pas spontanément désagrégées. Parmi les dolérites se trouvent des nodules roulés du rivage d'Ovifak; j'ai aussi des pyrites nickelifères provenant de régions différentes du Groënland, et elles ont été, comme on verra, d'un intérêt tout spécial pour mes études.

2. La bibliographie du sujet est résumée dans la liste suivante de publications que j'ai consultées avec soin :

Expedition to Greenland in the year 1870, by prof. A.-E. Nordenskjöld, in 3 Parts (*Geological Magazine*, vol. IX, 1872).

([1]) *Comptes rendus*, t. LXXIV, 1872, p. 1546, et *Bulletin de la Société géologique*, 3ᵉ série, t. IV, p. 111.

([2]) Mon opinion est enregistrée par le professeur Andrews dans son Adresse à l'Association Britannique en 1876 (*Reports of the proceedings of the British Association*, LXXIII).

Om förekomsten af gediget jern i en Basaltgang vid Ovifak i Grönland, etc., af Gustav Nauchkoff (Bihang till *K. Svenska vet Akad. Handling Medeladt* den 17 april 1872).

Examen des roches avec fer natif découvertes en 1870 par M. Nordenskjöld; par M. Daubrée (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXXIV, 24 juin 1872).

Om de Nordenskjöldske Jaernmasser og om Forekomsten af gedigent Jaern i Basalt, af K.-J.-V. Steenstrup (Af tryk af *Vidensk. Medd fra den naturhist. Forening.* Kjöbenhavn, 1875, n°s 16-19).

Examen des Météorites d'Ovifak (Groënland), au point de vue du carbone et des sels solubles qu'elles renferment; par M. Daubrée (*Comptes rendus*, t. LXXV, 29 juillet 1872).

Analyse des Meteoreisens von Ovifak in Grönland, von F. Wöhler (*Narch. König. Gesellschaft der Wissenschaften*, 15 mai 1872).

Om de Kulförende Dannelser fra Oan Disko, af K.-J.-V. Steenstrup (Af tryk af *Vidensk. Medd. fra den naturhist. Forening.* Kjöbenhavn, marto 1874).

Der Meteoriten fund bei Ovifak in Grönland, von G. Tschermak (*Mineralogische Mittheilungen*, 1874, 2 Heft).

Observations sur la structure intérieure d'une masse de fer native d'Ovifak, par M. Daubrée (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXXXIV, p. 66; 1877).

HISTOIRE DE LA DÉCOUVERTE ET GÉOGRAPHIE DES LOCALITÉS.

3. L'histoire de la découverte du fer est si bien connue, qu'il est superflu de dire, à son sujet, autre chose que ce qui est nécessaire pour relier entre elles les diverses Parties de ce Mémoire.

C'est durant son expédition au Groënland, en 1870, que M. Nordenskjöld découvrit ces masses ferrugineuses. Il visitait la baie de Fortune dans le but de découvrir la localité exacte du fer dit de Rudolph, parce qu'il a été trouvé par le gouverneur Rudolph dans un lest (qui avait

été pris par des navires dans cette baie de Fortune. Cependant, aucune trace de fer ne fut découverte dans cette localité; mais les indications données par les naturels, ainsi que ses propres recherches, conduisirent quelques mois plus tard M. Nordenskjöld à la place où gisaient les masses de fer qui vont nous occuper.

Il s'agit, comme on sait, d'Ovifak, ou Colline Bleue, dans l'île de Disko, c'est-à-dire un des points du plus difficile accès sur la côte du Groënland danois, situé entre Laxebugh et le port de Disko, 69° 19′ 30″ de latitude nord et 54° 1′ 22″ de longitude ouest.

La Carte ci-jointe (*Pl. II, fig.* 1) donne une idée nette de cette localité et de sa position par rapport aux autres points de la côte. Cette carte, dressée par M. Rink, a été corrigée par l'expédition suédoise de 1870, pour accompagner la relation du voyage de M. Nordenskjöld. On y voit qu'Ovifak est situé à l'extrémité sud-est de l'île de Disko, à l'entrée du détroit de Davis. Avec l'aide de M. Steenstrup, j'ai marqué sur la carte les localités exactes où du fer natif a été trouvé à différentes époques. Il y a deux autres points où le fer a été observé le long de la côte, mais ils sont situés en dehors de la région représentée : Ross, en effet, parle, en 1819, d'un fer possédé par les naturels de Sowalick, à peu près à 6 degrés au nord d'Ovifak, mais je pense qu'il n'y en a pas d'échantillons dans les collections. D'autre part, Fiskernäs, dans le Groënland du sud, à peu près à 6 degrés au sud d'Ovifak, a fourni un petit fragment métallique qui, lui, a été conservé. Il n'est pas du tout invraisemblable que le fer de ces deux dernières localités ne provienne de régions analogues à Disko.

4. M. Nordenskjöld, qui visita le premier la localité, décrit les caractères et donne des détails sur la position dans laquelle il trouva les fers.

Ils gisaient sur le rivage, entre le niveau de la haute et

celui de la basse mer, parmi des blocs de granite et de gneiss roulés, au pied d'une grande falaise basaltique d'où s'élève, plus haut encore, la série des couches horizontales de trass et de dolérite du mont Ovifak (*Pl. II*, *fig*. 2).

A 16 mètres du plus gros bloc, sous des détritus constituant la berge, un rocher basaltique, haut de $0^m,30$, peut être suivi sur 4 mètres de distance, de façon à se présenter comme faisant partie intégrante du sol en place. Une autre arête analogue, située près de la berge, court dans une direction parallèle et avec la même longueur. Cette dernière contient des blocs lenticulaires et disciformes de fer nickelé, qui ont l'apparence extérieure, la composition chimique et la résistance à l'air des fers météoriques.

Le fer est empâté dans le basalte, dont il est séparé par une mince écorce de rouille et qui présente, au voisinage des blocs de fer natif, des nodules de hisingérite, évidemment formée par l'oxydation du métal.

Sur une superficie qui ne dépasse pas 50 mètres carrés, M. Nordenskjöld trouva et recueillit plus de vingt masses de fer et de basalte renfermant du fer, pesant de 21 000 kilogrammes à moins de 1 kilogramme.

5. L'importance de ces faits au point de vue de l'étude de l'origine du fer est considérable. Aussi je crois devoir introduire dans mon travail les planches et les descriptions où M. le professeur Steenstrup a très-exactement résumé les caractères de la région d'Ovifak, qu'il a étudiée très-longuement pendant deux expéditions successives.

La *fig*. 3 (*Pl. II*) représente une partie des collines bleues (Ovifak) entre les promontoires de Nukkiterdick et de Nuck. Dans l'endroit où le fer fut recueilli, la montagne est haute d'environ 600 mètres, dont les 200 mètres inférieurs sont couverts de débris formant un talus incliné de 30 à 40 degrés. Au-dessus de ce talus, la paroi rocheuse, qui se relève presque verticalement, montre treize ou qua-

torze lits horizontaux de trapp. Au pied de la montagne, immédiatement au bord de la mer, un ou deux de ces lits sont visibles sur une falaise haute de 16 mètres, et les couches alternatives de basalte B et d'amygdaloïde M peuvent être suivies le long de la côte jusqu'au point I, où les fers furent trouvés, et même plus loin. La *fig.* 4 représente cette falaise à une plus grande échelle.

La *fig.* 5 montre la partie du basalte, formant un dyke, où le fer fut trouvé. La place des blocs métalliques est marquée par des points noirs I. Les points noirs sur le bord de la mer représentent les trois plus grosses masses qui furent amenées en Europe ainsi qu'on les voyait à marée basse. A marée haute, elles étaient recouvertes par l'eau. Les parties marquées B et M représentent les assises de basalte et d'amygdaloïde au voisinage du dyke.

SOLUTION DU PROBLÈME DE LA NATURE ET DE L'ORIGINE DU FER NATIF ET DES DOLÉRITES QUI LE CONTIENNENT.

Pour résoudre le problème qui concerne l'origine du fer, il y a beaucoup de points qui réclament une étude soignée et systématique. C'est dans ce but que j'ai traité le sujet sous les six points de vue développés dans les Chapitres suivants.

I. — *Nature du fer et de la dolérite, d'après les échantillons apportés du Groënland; leurs propriétés chimiques et physiques.*

6. Les échantillons que j'ai pu étudier se répartissent en deux grandes classes : ceux qui consistent presque exclusivement en fer et ceux qui se composent principalement de matières pierreuses. Les premiers comprennent les quatre types principaux dont voici l'énumération :

1° Les plus remarquables sont les gros blocs recueillis

avec tant de peine et de succès par M. Nordenskjöld. Ils sont de forme irrégulière et plus ou moins allongés. Leur surface est arrondie en tous sens et d'une couleur d'un brun foncé, avec beaucoup de points ayant l'éclat métallique. Ils sont très-pesants et, à première vue, les personnes familières avec les météorites les ont regardés comme constituant probablement des masses d'origine cosmique.

2° Nous possédons des échantillons d'un aspect plus inégal, qui résistent, sans se rompre, au choc du marteau et qui sont plus lourds encore que les précédents. Il y a même des fragments formés d'un fer pur et malléable; mais ils ont été exclusivement trouvés à l'intérieur de la dolérite.

3° Certains nodules roulés, de dimensions variables, consistent surtout en une sorte d'éponge de fer réduit en petits grains. On les brise au marteau, et leur surface polie montre des dessins dendritiques brillants, d'une régularité plus ou moins grande.

4° Nous trouvons des masses semblables aux précédentes, mais avec moins de fer; elles consistent en un mélange intime d'un minéral pierreux avec le métal réduit en filaments très-déliés.

Après ces quatre types, essentiellement métalliques, il faut citer :

5° Des masses d'une structure bréchiforme, avec fer métallique plus ou moins disséminé dans leur intérieur qui, par certains spécimens, passent à la dolérite presque pure.

Dans beaucoup de ces échantillons nous avons trouvé aussi de la pyrite nickelifère et, accidentellement, du graphite, intimement mêlé avec des matières siliceuses ou autres.

Je décrirai maintenant chacun de ces cinq types différents.

PREMIER TYPE.

Blocs métalliques.

7. L'une des plus grosses masses, pesant 7000 kilogrammes, fut de ma part l'objet d'un examen attentif en ce qui concerne son aspect extérieur. Une autre masse également très-belle, et pesant 5 kilogrammes, fut étudiée de plus près. C'était une parfaite miniature du bloc colossal de 21 tonnes dont il a été question ci-dessus. Je remarquai que ces deux masses étaient absolument dépourvues de crevasses ou de fissures, quoiqu'elles aient été abandonnées à l'air pendant plus de quatre ans, depuis leur arrivée du Groënland. On ne pouvait donc rien apercevoir au travers de leur enveloppe ocracée. De même des petites masses qui me furent envoyées du Musée royal de Copenhague, où elles étaient restées environ trois ans, sont restées dans mon laboratoire pendant huit ou neuf mois sans présenter la moindre altération. Mais, voulant étudier l'intérieur aussi bien que l'extérieur, je plaçai un des échantillons sur la machine à raboter, dans le but de pratiquer au travers une section passant par le centre. Je m'attendais à voir le fer compacte composer toute la masse, mais l'outil donna bientôt l'indication qu'il ne coupait plus du métal. Il n'avait pas pénétré jusqu'au centre qu'une des moitiés du bloc se brisa, montrant l'intérieur, qui n'était autre chose qu'un magma ou mélange de particules de fer avec de l'oxyde du même métal. La section, complétée cependant, fournit une moitié de la masse en un seul morceau. Je constatai alors avec surprise que, tandis que l'extérieur des blocs est dur et solide, l'intérieur, sur quelque point que ce soit, peut être aisément entamé au couteau ou au ciseau. Ces pièces, provenant du sciage, furent mises de côté dans mon cabinet pour être examinées plus tard, et, en les regardant dix jours plus tard, je vis que les plus petites étaient déjà tombées en poussière. La grande section commençait à subir le même effet, et, en moins de

trois mois, tout ce que j'avais de ce bel échantillon fut transformé en une masse rouillée et pulvérulente renfermant quelques fragments durs qui, à l'origine, faisaient partie de la croûte externe.

Ainsi donc, ce fer, réputé solide, cachait simplement derrière une croûte compacte une masse, à texture très-lâche, de particules métalliques et d'oxyde. Il est évident que la modification chimique qui s'était produite dans l'intérieur est le résultat d'une oxydation. Le fer et l'oxyde, qui n'est pas au maximum, absorbent à la fois de l'oxygène, et l'on observe comme effet de l'altération une légère augmentation de poids. Un fragment de l'intérieur, pris peu de temps après le commencement de la pulvérisation, fut de nouveau placé sur la balance au bout de quatre mois; l'augmentation de poids fut de 4,2 pour 100. M. Nordenskjöld dit que, dans une expérience, $5^{gr},406$ de cette matière ferrugineuse avaient acquis seulement $0^{gr},200$ par oxydation, c'est-à-dire 3,8 pour 100.

Quand la matière décomposée est lavée, la portion oxydée la plus légère est entraînée par l'eau, et il reste des petits grains de fer de formes variées, dont le diamètre est compris entre $\frac{1}{10}$ et $\frac{3}{10}$ de millimètre.

Différents procédés ont été employés pour prévenir la désagrégation. Le meilleur est, suivant moi, d'enfermer hermétiquement le fer dans un tube de verre ou de le placer dans l'alcool.

J'ai protégé ceux de mes échantillons qui commençaient à se craqueler, en les chauffant, pour couler ensuite de la paraffine dans leurs fissures. Cette méthode a obtenu un succès complet, mais la bonne conservation des échantillons doit être vérifiée de temps en temps.

Quelle est la cause de la désagrégation? Je suis persuadé qu'elle résulte de deux causes : d'abord, par la perte d'humidité, des craquelures se produisent à la surface, et, en second lieu, l'oxygène de l'air, trouvant accès par les

fissures dans l'intérieur, peut se combiner avec le fer finement divisé, ainsi qu'avec l'oxyde inférieur de fer. Il en résulte un gonflement de la masse, et le sulfure contribue aussi à cette désagrégation.

Ce qui prouve bien que l'oxygène de l'air, avec un peu d'humidité, joue le rôle le plus important dans cette désagrégation, c'est que dans l'eau le fer métallique s'oxyde, mais ne tombe pas en morceaux.

Parmi les échantillons provenant d'Ovifak, il y en a dont la forme a résisté parfaitement, comme on sait, aux intempéries, et cela sur un rivage orageux; de façon qu'en apparence ils sont aussi inaltérés et inaltérables que les masses de fer météorique. Cependant cette résistance n'est qu'apparente : le résidu de leur destruction a simplement pénétré dans l'intérieur, au lieu d'avoir été entraîné au loin. On vient de voir comment ce fait est nettement démontré par l'échantillon de 5 kilogrammes, et je suis sûr que, si l'on coupait de la même manière le bloc de 7000 kilogrammes qui figurait à l'Exposition de Philadelphie, on verrait en moins de six mois ce magnifique échantillon réduit en un tas de petits fragments.

Nous pouvons expliquer la conservation des blocs ainsi altérés en remarquant que l'eau de mer y a déposé un revêtement solide, compacte et imperméable, d'oxyde qui empêche le centre de se pulvériser. Si cette enveloppe protectrice est détruite d'une manière quelconque, alors le résultat est celui que nous avons décrit.

Voici maintenant la composition chimique des différentes parties des échantillons du premier type, c'est-à-dire :

1° Le revêtement extérieur;

2° La masse intérieure ;

3° Les particules de fer séparées du magma général.

8. *Revêtement extérieur.* — Sa densité égale 5.

L'eau régale en opère la dissolution avec dépôt d'un très-faible résidu.

Voici sa composition :

Oxyde de fer	76,21
Fer	16,56
Nickel	1,08
Cobalt	0,48
Cuivre	0,08
Soufre	1,12
Phosphore	0,14
Carbone	1,36
Eau	4,50
	101,53

Traces de chlore, de chaux et de magnésie.

Il n'y a pas de méthode convenable pour déterminer les proportions exactes des deux oxydes de fer, et, cette détermination n'ayant ici qu'une faible importance, on ne l'a pas faite.

9. *Le magma intérieur de la masse.* — La composition de celui-ci ne diffère pas essentiellement de celle de la croûte, sauf en ce qui concerne la proportion de fer métallique, qui est plus grande, et la proportion de chlore, qui est moindre. Le fer représente 22,32 pour 100, le nickel 1,37, le cobalt 0,65, et un résidu insoluble 4. Une faible partie des constituants du magma consiste en sels solubles, ce qui était prévu, puisque M. Daubrée, dans les analyses du type le plus compacte, a trouvé du sulfate de chaux et des chlorures de calcium et de fer. A cette liste j'ajouterai les sulfates solubles de nickel, de cobalt et de cuivre, qui doivent résulter de la décomposition d'un sulfure.

Le carbone non combiné, dans le magma, est un trait

intéressant de sa composition, car les autres fers natifs, de quelque origine qu'ils soient, montrent une constitution très-différente.

Si le magma, traité par de l'acide chlorhydrique concentré, est chauffé au bain-marie, un gaz s'en dégage avec une odeur désagréable, analogue à celle que produit dans les mêmes conditions la fonte riche en carbone combiné. Si, lorsque l'action de l'acide a cessé, on sépare la liqueur du magma, et si on la remplace par de l'acide en grand excès, bientôt tout ce qui est soluble est enlevé. Le résidu, lavé et séché à 100 degrés, consiste en une poudre noire dont les grains sont plus ou moins brillants et ressemblent à de petits fragments de houille, ou encore au carbone qui se dépose au rouge à l'intérieur d'un tube de porcelaine traversé par la vapeur d'un hydrocarbure. En chauffant ce charbon dans une capsule de platine, on le voit s'enflammer, brûler rapidement et laisser des cendres. Il peut avoir originellement été en combinaison avec le fer et en avoir été séparé par l'oxydation de la masse, mais il peut aussi provenir de la décomposition d'un hydrocarbure. En tous cas, il est sans doute la cause de la production de l'acide carbonique quand cette variété de fer est chauffée, phénomène qui a porté quelques personnes à penser que, puisque l'acide carbonique est dégagé quand le fer est porté au rouge, celui-ci ne peut pas avoir été porté à cette température lors de sa formation. Cette conclusion, cependant, n'est pas logique, puisque la fonte ordinaire, à demi décomposée par l'action de l'air et de l'humidité, dégage également de l'acide carbonique quand elle est chauffée. L'acide carbonique est dans ce cas un simple produit de décomposition, comme M. Nordenskjöld l'a montré en dissolvant le fer dans le bichlorure de mercure sans dégagement d'aucun gaz.

10. *Les particules de fer séparées complétement du magma* présentent une densité de 6,42.

Voici leur composition :

Fer....................	93,16
Nickel....................	2,01
Cobalt....................	0,80
Cuivre....................	0,12
Phosphore....................	0,32
Soufre....................	0,41
Chlore....................	0,02
Carbone combiné....................	2,34
	99,18

On ne trouve pas de graphite dans ces particules de fer. Le carbone fut dosé en traitant le fer par le chlorure double de cuivre et d'ammoniaque. Traité par l'éther, le carbone fourni par 10 grammes de fer donna 0gr,005 de cristaux aciculaires, consistant principalement en soufre avec un peu de carbone.

Ajoutons que le carbone extrait du fer est naturellement un produit altéré (hydraté), exactement comme le carbone amorphe séparé de l'acier ou de la fonte. La très-grande proportion de carbone combiné dans le fer d'Ovifak, sans traces de graphite, est un fait très-intéressant et demande une étude chimique spéciale.

DEUXIÈME TYPE.

Le fer malléable.

11. J'ai ensuite examiné le fer extrait de la dolérite, sous forme de gros morceaux débarrassés, autant que possible, des silicates adhérents, qui furent réduits à représenter moins de 1 pour 100 du fer. Je trouvai que ces nodules diffèrent les uns des autres par leurs caractères et leur composition. Certains d'entre eux, quand on les frappe avec un marteau, se brisent sous le choc; d'autres sont beaucoup plus malléables et s'écrasent. J'examinerai seulement ici ces derniers. Le meilleur échantillon, à cet égard, m'a été donné en 1873 par M. Nevill.

J'en fis plusieurs essais, et les résultats, parfaitement concordants entre eux, diffèrent de ceux fournis par le premier type de fer. J'ai été spécialement frappé de la plus grande proportion de nickel et de la quantité relativement moindre de cobalt, ainsi que de l'absence presque totale de carbone combiné. Ce dernier fait n'avait pu être constaté d'une manière absolument satisfaisante par la méthode analytique, à cause de la faible quantité dont je disposais; aussi me suis-je contenté d'apprécier l'odeur du gaz hydrogène mis en liberté par l'action de l'acide sur le métal.

La densité est de 7,46, et la composition consiste en :

Fer	90,17
Nickel	6,50
Cobalt	0,79
Cuivre	0,13
Silice (résidu)	1,54
	99,13

Des traces de magnésie et de chaux sont sensibles. Je n'avais pas assez de substance pour rechercher le soufre, le phosphore et le carbone; ce dernier cependant doit exister, quoiqu'en très-faible quantité, car le gaz dégagé par l'acide sulfurique avait une odeur perceptible.

TROISIÈME TYPE.

Fer en lingots irréguliers et rouillés, moins altérés que celui de la première sorte.

12. Cette variété d'échantillons est la plus pesante de toutes, sauf les particules métalliques dont il vient d'être question (11). Ils ont une surface rouillée et noueuse. En masse, ils offrent une grande résistance au choc du marteau. Quand ils sont coupés, les sections présentent une apparence métallique plus nette qu'aucun des autres échantillons, sauf ceux du deuxième type. Une fois polis,

ils montrent une surface brillante où l'eau-forte dessine des dessins ayant quelque ressemblance avec les figures de Widmannstætten et qui, après un certain temps d'exposition à l'air, s'oxyde et laisse exsuder du chlorure de fer.

Si une lame de ce fer, d'environ 5 millimètres d'épaisseur, est frappée avec un marteau, elle se brise et montre une cassure très-cristalline où l'on reconnaît quelquefois la présence d'un minéral siliceux.

Dans un mortier, le métal se réduit en particules très-fines qui, sous l'action de l'acide azotique, se dissolvent rapidement et donnent une quantité variable de résidu. Dans l'échantillon examiné, ce résidu représentait de 4 à 5 pour 100.

La densité du métal est de 6,80.

L'analyse lui assigne la composition suivante :

Fer	88,13
Nickel	2,13
Cobalt	1,07
Cuivre	0,48
Phosphore	0,25
Soufre	0,36
Chlore	0,08
Silicates	4,20
Carbone (combiné)	2,33
Magnésie	traces.
	99,03

Cette variété de fer ressemble très-exactement au fer de Niakornak (Groënland) qui passe pour météorique, à tort comme on verra.

Avant de quitter la description de ce troisième type de fer, je donnerai les analyses de divers échantillons faites par des chimistes habiles et qui sont consignées dans les Mémoires auxquels j'ai renvoyé en commençant.

I. Analyse d'un fragment d'une des grandes masses, par M. Nordenskjöld.—II. Analyse d'un échantillon de fer plus

compacte, par M. Nordström. — III. Analyse d'un fer offrant les figures de Widmannstætten et provenant de la côte basaltique, par M. Lindström. (Dans ces trois analyses, les auteurs se sont débarrassés, autant que possible, de toutes les substances associées au fer et qui avaient subi des altérations.) — IV. Analyse par M. Wöhler. — V. Analyse par M. Daubrée. (L'analyse n° IV fut exécutée sur un fragment altéré analogue, sous ce rapport, à la croûte que j'ai examinée, mais avec moins d'altération.)

	I.	II.	III.	IV.	V.
Fer	84,49	86,34	93,24	46,60	80,80
Fer (combiné)	»	»	»	»	1,60
Nickel	2,48	1,64	1,24	1,19	2,65
Cobalt	0,07	0,35	0,56	0,47	0,91
Cuivre	0,27	0,19	0,19	»	»
Alumine	»	0,24	»	»	»
Chaux	»	0,48	»	»	»
Magnésie	0,04	»	traces	»	»
Potasse	»	0,07	0,08	»	»
Soude	»	0,14	0,12	»	»
Phosphore	0,20	0,07	0,03	0,15	»
Soufre	1,52	0,22	1,21	»	»
Chlore	0,72	1,16	0,10	»	»
Silice	»	0,06	0,59 (Silice et Portion insoluble)	»	0,291
Portion insoluble	0,05	4,37			
Matière charbonneuse organique. Oxygène, eau et perte	10,16	3,71	»	»	»
Carbone	»	»	2,30	3,96	»
Carbone combiné	»	»	»	»	2,60
Carbone libre	»	»	»	»	0,30
Sulfate de fer	»	»	»	7,75	»
Hydrogène	»	»	0,07	»	»
Oxyde de fer magnétique	»	»	»	40,20	»

	I.	II.	III.	IV.	V.
Chlorure de calcium.	»	»	»	»	0,233
Chlorure de fer....	»	»	»	»	0,089
Sulfate de chaux...	»	»	»	»	0,053

En parcourant ces analyses, on y reconnaît un grand nombre de corps qui proviennent de la décomposition; mais il n'est pas difficile de les éliminer et de se faire ainsi une opinion très-exacte de la composition originelle des fers.

QUATRIÈME TYPE.

Échantillons consistant en un mélange de dolérite et de fer.

13. Les échantillons de ce type offrent le plus vif intérêt, car sans eux il n'y aurait pas moyen de résoudre le problème de l'origine des masses, tandis que leur examen critique conduit sans peine à élucider aisément les points les plus importants de la question. Ils n'ont pas de caractère métallique à l'extérieur ni sur leurs surfaces de fractures, sauf dans de petits points disséminés; mais, si on les polit, on y voit apparaître de nombreuses grenailles métalliques, variables de formes et de dimensions. Il existe cependant une variété dont la fracture est fortement métallique; la dolérite n'y est qu'en faible proportion et la densité, en conséquence, en est très-élevée : 5,70. Le meilleur échantillon de ce type que j'aie étudié m'a été fourni par M. Daubrée.

Une fois coupés et polis, les fers qui nous occupent présentent des lignes d'un brillant métallique et d'un caractère dendritique. Les figures sont formées fréquemment de fines lignes droites et courbes se croisant sous tous les angles possibles. Le fer est évidemment là sous une forme très-singulière, et sa structure, admirable de délicatesse, ne s'accommoderait pas d'une introduction postérieure dans une roche déjà formée, et indique évi-

demment que la solidification du métal est contemporaine de celle des matériaux pierreux.

Le fer du quatrième type est facilement réduit en poudre, et la matière métallique peut être isolée avec un barreau aimanté. Les deux substances, fer et pierre, ainsi séparées, ont été purifiées autant que possible de toutes matières étrangères et analysées. On a reconnu que, malgré tous les efforts, le fer retient toujours un peu de matière siliceuse; mais, en déduisant celle-ci, l'analyse s'accorde avec celle du fer déjà étudié (10).

La matière pierreuse a la composition de la dolérite de la même région qui sera donnée plus loin.

Comme on l'a dit déjà, les surfaces que l'on polit au travers des masses sont couvertes de lignes et de points métalliques ayant l'aspect du fer. Cependant une solution de sulfate de cuivre ne se précipite pas sur tous; certains d'entre eux restent brillants et inaltérés. Ils ne sont pas constitués par de la pyrite, quoique ce minéral fasse partie de la roche; mais je suis porté à croire que, parmi eux, les uns sont du fer fortement carburé et les autres du graphite.

Le graphite a été séparé parfaitement au moyen de l'acide fluorhydrique, et le lavage a donné comme résidu de petits nodules de fer.

Les parties légères enlevées par le lavage retiennent des fluorures insolubles; on y trouve aussi du carbone amorphe, qui provient de la petite quantité de fer dissoute, et des petites écailles de graphite. Ces dernières peuvent être purifiées en les chauffant d'abord avec l'acide sulfurique concentré, puis avec un mélange d'acide azotique et d'acide fluorhydrique, et enfin avec une grande quantité d'eau, et répétant ces opérations s'il est nécessaire. Le graphite reste alors seul avec un peu de carbone amorphe qu'on brûle facilement. C'est du vrai graphite pouvant donner de l'oxyde graphitique.

Le n° III provient d'un galet roulé, comme il en existe beaucoup sur le rivage.

Pour le n° IV, c'est la reproduction de l'analyse faite par Nauchkoff de la dolérite formant la gangue principale du fer d'Ovifak. Ce chimiste trouve, outre les constituants déjà mentionnés, de petites quantités de soufre, de carbone, de phosphore et d'acide titanique; c'est aussi ce que j'ai observé de mon côté dans les trois roches I, II et III.

II. — *Caractères géologiques de l'île de Disko et caractères géologiques des roches à fer natif, comparés à ceux des roches dépourvues de fer. Remarques sur les colossales formations basaltiques du Groënland et d'autres régions septentrionales, pénétrant et recouvrant des couches charbonneuses et des dépôts de débris végétaux.*

15. L'île de Disko, dont nous avons spécialement à nous préoccuper, présente, aussi bien que la péninsule de Noursoak, des nappes continues et des dykes de basalte qui ont disloqué les dépôts miocènes et se sont étendus sur eux. Ces couches tertiaires sont citées pour leurs couches répétées de lignite et pour leurs dépôts de plantes fossiles.

Tout le long du détroit de Waigat, de nombreuses localités sont indiquées sur la côte comme riches en combustibles, et la mine de charbon de Ritenbenk est peu éloignée au nord de Kudliset. A Netluarsak, des dépôts de combustible se montrent dans le basalte même, entre Noursak et Noursoak.

Outre le charbon, on trouve fréquemment, comme l'ont observé M. Rink et d'autres, à Atanekerdluk, exactement sur le bord opposé du détroit par rapport aux mines de Ritenbenk, des fragments de bois carbonisé et quelquefois des troncs d'arbres tout entiers couchés parallèlement à la direction des couches.

Dans certains points, sur les deux rives du détroit de Waigat, les couches de houille disparaissent sous le trapp, à 500 ou 600 pieds au-dessous du niveau de la mer.

M. Nauchkoff, en explorant la roche basaltique, y trouva le fer, en partie sous forme de grosses masses ellipsoïdales, en partie à l'état de petites boules et de fines particules. En outre, il rencontra du fer altéré comme ciment des galets, réunis en une brèche, et cela également à la surface et dans la profondeur. Il signale enfin çà et là le métal en petites veines remplissant vraisemblablement des fissures.

La plus grande profondeur où il ait poussé ses investigations ne dépasse pas 2 ou 3 pieds, et le fer solide y a été trouvé altéré. Le basalte ainsi exploré était très-certainement en place et n'existait pas à l'intérieur du fer.

Comme on voit, la géologie de l'île de Disko est en définitive très-simple : l'assise inférieure est de gneiss et, par-dessus, se montrent des roches sédimentaires de la formation miocène. Ces dépôts abondent en lits de lignite et de plantes fossiles, qui sont pénétrés, recouverts et profondément altérés par des dykes et des nappes de basalte d'âge récent. Une partie des substances charbonneuses a été convertie en graphite, qui, dans beaucoup de points, est mélangé au basalte.

16. Nous arrivons maintenant à l'un des points les plus importants pour la détermination de l'origine du fer. Il s'agit de l'étude lithologique des roches contenant le fer, comparées à celles qui en sont dépourvues.

J'ai examiné des échantillons de basalte de la partie métallifère de l'île de Disko, à une petite distance de la localité précise d'Ovifak. Ces roches ne contiennent aucune particule de fer métallique, et les analyses de deux échantillons pris en des points différents donnèrent les compositions inscrites au tableau suivant sous les n^{os} I et II. Le n° III est la copie de l'analyse, par M. Nauchkoff, d'une do-

lérite colonnaire située à 10 milles à l'ouest de Godhaven.

	I.	II.	III.
Silice	48,02	49,02	49,18
Alumine	15,06	13,11	13,52
Oxyde ferrique	6,50	5,03	5,52
Oxyde ferreux	9,45	11,20	10,31
Oxyde de manganèse	0,12	0,20	0,28
Magnésie	8,62	8,16	6,83
Chaux	9,52	10,10	11,51
Soude	1,50	1,33	1,84
Potasse	0,73	0,35	0,06
Phosphore	0,06		0,13
Eau		1,80	0,34
Acide titanique			0,52

I et II ont donné des traces de nickel et de cobalt.

Je n'ai pas cherché à séparer l'acide titanique qui doit être présent dans ces roches, ni à reconnaître les autres constituants qui peuvent se présenter sous la forme de faibles traces.

Si l'on compare la composition de ces dolérites avec celle des dolérites à fer natif et avec celle de dolérites provenant d'autres régions du globe, en bornant la comparaison aux cinq éléments principaux, on reconnaît que, chimiquement, la roche à fer natif ne présente aucun caractère distinctif.

N° 1. Trapp ancien, feuilleté, à gros grains, provenant du mont Esja, en Islande.

N° 2. Roche de couleur plus claire que le basalte, du mont Hogafjall, en Islande.

N° 3. Basalte amygdaloïde du mont Ararat, en Asie Mineure, contenant environ $\frac{1}{4}$ de trachyte.

N°s 4 et 5. Calculs faits par Bunsen de la composition comparative des roches pyroxéniques du Caucase et de l'Islande.

N°s 6 et 7. Comparaison montrant l'étroite analogie des

roches à palagonite (6) et des trapps pyroxéniques de l'Islande (7).

N° 8. Dolérite des dykes de Greenville, au Canada.

N° 9. Dolérite de York County, Pensylvanie.

N°s 10, 11, 12 et 13. Dolérite des vallées du Connecticut, de points nettement séparés les uns des autres.

N° 14. Dolérite à fer natif d'Ovifak, d'après M. Nauchkoff.

N° 15. La même, d'après mon analyse.

	Silice.	Alumine.	Oxyde de fer.		Chaux.	Magnésie.	Alcalis
1.	50,05	18,78	11,69		11,66	5,20	»
2.	49,17	14,89	15,20		11,67	6,82	»
3.	54,84	26,54			9,51	5,39	3,70
4.	48,47	31,97			11,56	4,72	3,28
5.	48,47	30,16			11,87	6,89	2,61
6.	49,24	30,82			9,73	7,97	2,33
7.	48,47	31,16			11,87	6,89	2,61
8.	50,25	32,10			9,63	5,04	2,70
9.	52,53	25,70			10,27	7,99	2,79
			Protoxyde de fer.	Sesquioxyde de fer.			
10.	52,11	14,29	8,30	3,61	10,77	7,67	2,54
11.	53,54	14,37	9,95	1,98	9,53	6,49	3,48
12.	51,90	16,77	10,74	2,00	7,83	6,31	4,34
13.	51,06	16,35	10,79	3,88	8,72	5,33	3,32
14.	49,18	13,52	10,31	5,52	11,51	6,83	1,90
15.	48,25	14,08	10,32	5,76	9,81	8,39	1,96

Je n'ai pas cherché à déterminer la composition minérale de la dolérite d'Ovifak, en calculant la proportion d'oxygène de la silice dans cette roche, car j'ai pensé que cette méthode serait parfaitement inutile. En effet, les minéraux mélangés sont trop variés et leurs proportions sont loin d'être assez fixes pour qu'on puisse les estimer de cette

manière. Le seul procédé qui permette d'y parvenir est de soumettre la roche à une étude microscopique. Quoique de grands progrès aient été faits dans l'étude des caractères optiques des minéraux pendant ces dernières années, il reste cependant beaucoup à apprendre dans cette voie, spécialement en ce qui concerne la distinction mutuelle des feldspaths. Nous ne sommes pas disposé à adopter les vues de M. Tschermak relativement à ce groupe de minéraux, sur lesquels de vives lumières ont été jetées par les récents travaux de M. Des Cloizeaux. Il faut, pensons-nous, abandonner l'idée de classer les feldspaths en trois espèces définies, variant seulement par mélange.

Les essais chimiques, s'ajoutant à l'examen microscopique, sont souvent capables de décider certains points négatifs, et même, parfois, de nous fournir des données positives. C'est ainsi que je crois avoir reconnu d'une façon certaine que l'anorthite n'existe pas dans la dolérite d'Ovifak, si ce n'est peut-être en quantité très-minime.

J'ai préparé, dans ce but, des sections minces de nombreux échantillons de dolérites, les unes sans fer, les autres avec fer. Elles ont été examinées au microscope, et je suis heureux de dire que j'ai été aidé dans mes travaux par M. G.-W. Hawes, de New-Haven, très-habile spécialiste dans ce genre de recherches. Aussi puis-je annoncer les résultats avec beaucoup d'assurance.

Ce qui frappe tout d'abord, c'est un assemblage d'augite et de plagioklase avec une proportion considérable d'olivine en gros fragments, très-irréguliers, dont les contours sont arrondis. Çà et là se détachent des lamelles vertes de viridite et des grains noirs de magnétite. On retrouve de tous côtés des traces du résidu vitreux, imprégné souvent de magnétite et présentant des caractères très-nets d'altération. Enfin le fer métallique se présente en grains anguleux enveloppés d'un épais revêtement noir.

17. Mon opinion, comme celle de M. Hawes, est que le

feldspath de cette roche, désigné précédemment sous le nom vague de plagioclase, est le labradorite. Il ressemble en effet, d'une manière intime, à des échantillons bien définis de ce minéral. On ne saurait y voir de l'anorthite, comme je l'ai prouvé chimiquement de la manière suivante :

2 ou 3 grammes de chaque échantillon furent réduits en poudre fine et additionnés d'environ 10 à 15 grammes d'acide chlorhydrique concentré. Après dix-huit ou vingt heures, le liquide, abandonné à la température ordinaire et agité plusieurs fois, fut filtré. On n'y trouva que des traces très-faibles de chaux, et dans plusieurs cas même ces traces firent défaut. Les silicates attaqués semblent avoir été de l'olivine et des chlorites, car il y avait abondance de magnésie dans la liqueur. Si l'anorthite eût existé dans la roche, elle aurait été attaquée par l'acide, et la chaux aurait facilement été trouvée dans le liquide.

Bien que la chose ne fût pas indispensable pour établir l'exactitude de ma conclusion, cependant il me parut intéressant d'examiner les basaltes de la variété dite *diabase,* connus pour contenir l'anorthite en cristaux assez volumineux. Ces roches me furent envoyées par M. Hawes, qui les a étudiées avec le plus grand soin. Elles provenaient de New-Haven et de Hanovre, dans le New-Hampshire. Je les traitai par l'acide chlorhydrique, comme il vient d'être dit, et dans tous les cas un abondant précipité de chaux se produisit. Le même fait se renouvela avec un échantillon de lave du Vésuve, renfermant des cristaux d'anorthite.

Ainsi je puis dire avec assurance que la dolérite d'Ovifak ne contient pas d'anorthite, au moins dans aucun des échantillons qui m'ont été envoyés comme types. On verra pourquoi j'insiste sur cette circonstance.

18. Pour résumer les caractères lithologiques de la dolérite à fer natif d'Ovifak, nous conclurons que c'est une dolérite aux éléments largement cristallisés. Le fer natif y est parfois enveloppé d'un minéral noir formé probablement

de magnétite, mais fréquemment aussi les minéraux basaltiques ont cristallisé immédiatement contre le métal, le labradorite le pénétrant même avec des arêtes et des angles très-vifs. L'olivine y est d'une couleur brun jaunâtre et paraît très-altérée. La matière vitreuse n'est pas aisément reconnaissable, à cause de sa rareté et de la présence dans sa masse de petites particules cristallines provenant de sa dévitrification.

Sur beaucoup de points, nous avons trouvé de la viridite, une chlorite imparfaitement définie qui ne polarise pas la lumière, mais agit comme du verre vert, de la nature duquel on l'a souvent rapprochée. L'augite et le feldspath (labradorite) sont tous les deux intacts.

III. — *Nature des minéraux associés au fer et à la dolérite, et relations dans lesquelles ils ont été trouvés.*

Ces minéraux sont : 1° de la pyrrhotine ; 2° du graphite ; 3° de la hisingérite ; 4° de la magnétite ; 5° du spinelle ; 6° du corindon.

19. *Pyrrhotine* ou *pentlandite*. — Ce minéral se trouve adhérent au basalte, depuis l'état de petites taches jusqu'à celui de blocs, de volume considérable. Sa couleur est tout à fait celle de la pyrrhotine ordinaire et diffère, par l'aspect comme par la structure, des gros nodules de troïlite trouvés dans les météorites, auxquelles on l'a quelquefois comparé. Des minéraux silicatés pénètrent dans son intérieur d'une manière si intime, qu'ils ne peuvent en être complétement séparés. Aussi l'avons-nous analysé en mélange avec une quantité de ces minéraux, que, malgré les plus grands soins, nous n'avons pu réduire à moins de 6 pour 100, d'où il résulte que les analyses ne sont pas très-satisfaisantes. Le minéral le plus difficile à séparer est un silicate noir qui pénètre dans

toutes les directions, jusque dans les parties presque microscopiques.

La densité de la pyrrhotine est égale à 4,46. D'après plusieurs analyses, qui ne concordent pas exactement, je lui attribue la composition suivante :

Soufre.................	38,38
Fer...................	58,48
Nickel.................	1,05
Cobalt.................	0,55
Cuivre.................	1,58

Ces chiffres ne représentent pas exactement la composition de la pyrrhotine, qui demande : soufre, 39,5, et fer, 60,5 ; mais nous savons que ce minéral se trouve dans la nature avec des compositions comprises entre $Fe^7 S^8$ et $Fe^8 S^9$, et qu'il est difficile de rencontrer des échantillons de différentes localités ayant une composition concordante, surtout s'ils ne sont pas cristallisés.

M. Nauchkoff, en parlant de ce sulfure, l'appelle *troïlite,* mais avec doute. $0^{gr},837$ séchés donnèrent 0,0225 d'acide silicique, 0,073 de sesquioxyde de fer, et 0,054 de protoxyde de nickel, ce qui correspond à :

Silicate colloïdal.........	8,59
Fer...................	52,94
Nickel.................	5,06
Cuivre	traces
Soufre (par différence)...	33,41
	100,00

En faisant abstraction du silicate, on a :

Fer...................	57,91
Nickel.................	5,35
Soufre (par différence)...	36,56
	100,00

qui concorde avec la formule (Fe, Ni) S.

Comme le soufre est ici dosé par différence, il est important de savoir si le sulfure desséché contient encore de l'eau. J'ai fait le dosage par la méthode directe, et j'ai reconnu qu'on ne peut pas avoir d'échantillon qui ne donne 1,50 à 2,00 pour 100 d'eau. Cette eau doit provenir du silicate contenu dans le sulfure, sans doute de la hisingérite, qui ne peut en être séparée complétement. Par conséquent, le calcul précédent doit être modifié : le soufre ayant été estimé par différence, sa proportion doit être encore abaissée.

A ce propos, le même auteur se réfère à l'analyse faite par Rivot de la pyrite nickelifère de Craigmuir, qui a été aussi examinée par Forbes :

	Rivot.	Forbes.
Fer	54,8	50,87
Nickel, Cobalt	7,6	11,03
Soufre	35,8	37,99
Résidu insoluble	1,0	0,38

Cependant on voit que l'une ou l'autre se rapproche de la troïlite aussi bien que le sulfure d'Ovifak, d'après M. Nauchkoff.

En résumé, la composition de ce minéral est connue d'une manière fort peu satisfaisante. C'est ce qui arrive toujours quand on est contraint d'analyser des mélanges, alors même que les substances étrangères sont en faible quantité, et surtout s'il n'existe qu'une légère différence entre deux matières à distinguer l'une de l'autre, comme c'est le cas pour la troïlite et la pyrrhotine.

Mes propres analyses, quoique faites avec beaucoup de soin, me paraissent également insuffisantes pour déterminer l'espèce exacte de ce sulfure; mais je ne vois pas de raison dans mes résultats pour conclure à autre chose qu'à la pyrrhotine. De plus, on remarquera que la densité

du sulfure examiné est d'environ 0,40 plus faible que celle de la troïlite, alors que la proportion du silicate présent ne pourrait expliquer que le $\frac{1}{5}$ de cette différence. Enfin j'ajouterai que ce minéral est beaucoup plus attirable à l'aimant que la troïlite. J'ai souvent fait de soigneuses analyses de ces deux sulfures et je les ai comparés entre eux ([1]), après les avoir obtenus avec la plus grande pureté; ainsi je crois parler avec quelque force quand je déclare que ce sulfure est simplement de la pyrite nickelifère (pentlandite) ou de la pyrrhotine, et non pas de la troïlite.

20. *Graphite.* — L'existence du graphite, en association avec le basalte et le fer, n'a pas été l'objet de toute l'attention qu'elle mérite. M. Nauchkoff n'a dit que peu de chose à cet égard. M. Steenstrup a cependant étudié le fait plus soigneusement, et a recueilli deux échantillons où le graphite et la dolérite se pénètrent réciproquement. J'en possède un excellent spécimen, qui provient du Musée royal de Copenhague, et que je dois à l'obligeance de MM. Johnstrup et Steenstrup.

J'ai fait une très-mince section de l'un de ces échantillons dont une moitié est graphitique et l'autre doléritique. Le résultat de l'examen microscopique sera donné à propos du spinelle et du corindon.

La composition de la dolérite associée au graphite est semblable à celle de la plus grande partie du basalte de cette région; en examinant la portion où le graphite est le plus net, on voit que les minéraux silicatés y offrent la même composition générale que dans le basalte proprement dit, avec cette différence marquée qu'il contient une quantité considérable d'un minéral alumineux reconnu pour du corindon, comme on verra plus loin (24).

Le graphite séparé de la silice fournit de l'oxyde

([1]) *Comptes rendus*, t. LXXXI, p. 976; nov. 1876.

graphitique quand on le traite par l'acide azotique fumant et le chlorate de potasse. Le graphite se rencontre aussi dans les portions du basalte où il n'est pas visible à l'œil nu, et on peut le séparer par le procédé décrit antérieurement.

21. *Hisingérite.* — Ce minéral existe en concrétions arrondies, d'un vert très-foncé, en petits fragments, mais opaques et noires, quand on le voit dans la masse. Il est, le plus ordinairement, associé avec le sulfure, et c'est ainsi qu'il se présente dans un minerai de cuivre à Riddarhyttan. C'est évidemment un minéral secondaire, résultant d'altérations subies par la dolérite, et ce fait explique la variation de sa composition en différentes localités, spécialement en ce qui concerne la proportion d'eau.

J'ai analysé un échantillon pesant 200 milligrammes, débarrassé, aussi complétement que possible, des minéraux associés, et je le trouvai composé comme il suit :

Silice	30,04
Peroxyde de fer	57,12
Eau	10,89
	98,05

L'analyse faite par M. Nauchkoff d'un autre échantillon avait donné :

Silice	31,70
Peroxyde de fer	51,49
Protoxyde de fer	3,81
Eau	13,56
	100,56

22. *Magnétite.* — Je n'ai, parmi mes échantillons, que de petits grains de ce minéral disséminé dans le basalte. Un minéral noir, communément disposé autour des grenailles de fer, est également considéré comme étant de la magné-

tite. Je n'ai cependant pas trouvé de méthode pour décider, d'une manière positive, si ce n'est pas de l'hisingérite. En l'examinant au microscope, j'ai constaté qu'il a souvent l'aspect d'une scorie noire et que cette bordure sombre des grains de fer se présente aussi quelquefois comme une sorte d'ombre.

23. *Spinelle.* — Le spinelle a été observé dans le basalte renfermant du fer natif. Les seules indications que j'aie eues sont tirées de caractères chimiques.

24. *Corindon.* — La dolérite graphitique, chauffée au rouge dans l'oxygène, donne :

Graphite	17,50
Résidu (1)	82,50
	100,00

Le résidu, fondu avec un mélange de carbonate de soude et de potasse et un peu de soude caustique, puis traité par l'eau et l'acide chlorhydrique, laisse un second résidu minéral non attaqué, égal à 22 pour 100. La portion décomposée renferme :

Silice	34,16
Alumine	33,85
Protoxyde de fer	17,00
Chaux	8,80
Magnésie	4,23
	98,04

25. Les 22 pour 100 inattaqués par la première fusion furent fondus de nouveau avec les alcalis caustiques et carbonatés, et une petite portion seule devint soluble. La partie

(1) Ce résidu est un peu plus fort qu'il ne devait être à cause de l'absorption d'un peu d'oxygène par le protoxyde présent dans le minéral; par conséquent la proportion de graphite est trop faible.

insoluble fut cependant complétement décomposée par le bisulfate de potasse. Elle contenait :

Silice	0,95
Alumine	92,02
Oxyde de fer	3,25
Magnésie	2,68
	98,90

J'ai fait un examen plus complet de ce minéral alumineux en traitant la dolérite graphitique, grossièrement pulvérisée, par l'acide fluorhydrique, puis en chauffant dans l'oxygène le résidu lavé, afin de brûler le graphite, ce qui n'a lieu qu'après une longue action du gaz comburant. Le résidu fut fondu avec les carbonates de soude et de potasse additionnés d'un peu de soude caustique, puis attaqué par l'acide chlorhydrique, qui laissa une grande quantité de petits grains irréguliers, très-durs, d'une couleur gris clair bleuâtre, et quelques points noirs. Chauffés avec le bisulfate de soude et de potasse, ces grains se décomposent rapidement, et la masse, dissoute complétement dans l'eau, donne 98 pour 100 d'alumine avec un peu de fer et une trace de magnésie.

Dans ses recherches de 1872, M. Daubrée rappelle que M. Berthelot, en examinant un des échantillons de fer, trouva un faible résidu d'une substance noire, très-dure, qui ne devint soluble qu'après la fusion avec le bisulfate de potasse. C'est certainement la même matière que le minéral dont je viens de donner l'analyse, et qui, bien évidemment, est mélangée avec un peu de spinelle.

Ce dernier minéral fut attaqué par la fusion avec les alcalis et les carbonates alcalins, et cette attaque rend compte de la forte proportion d'alumine trouvée dans cette partie de l'analyse.

L'examen microscopique de certains échantillons de basalte m'offrit un minéral d'une belle teinte rose. Je

pensai d'abord qu'il consistait en chlorite rouge, et un examen subséquent le fit rapporter au sphène rouge. Mais, après que j'eus étudié la section du graphite dans la dolérite citée au n° 20, l'abondance avec laquelle il fut trouvé me permit de faire sur lui des essais chimiques.

Une section taillée à travers un spécimen de dolérite montre, en association avec du graphite, un minéral rose qui est probablement du corindon, quoique les observations optiques ne soient pas certaines.

Voici enfin une expérience complémentaire, relative à la présence du corindon : une très-mince tranche préparée pour le microscope fut placée sur une lame transparente de spath fluor et plongée dans l'acide fluorhydrique concentré. Les minéraux silicatés disparurent laissant des particules roses disséminées dans une lame de graphite qui put être examinée au microscope après qu'on eut lavé la plaque avec précaution et qu'on l'eut, après dessiccation, recouverte d'une lamelle de verre.

On trouve aussi quelquefois du corindon dans les sections de basalte ne contenant que des traces de graphite, et j'en possède un ou deux échantillons très-nets.

IV. — *Composition des roches doléritiques provenant d'autres parties du Groënland, et spécialement de celles qui contiennent du fer métallique et de la pyrrhotine.*

26. Comme le montre la Carte jointe à ce Mémoire, Ovifak n'est pas la seule localité de l'île de Disko où du fer métallique se trouve dans la dolérite. M. Steenstrup, supposant au fer d'Ovifak une origine terrestre, pensa naturellement que le même métal devait se trouver dans des localités voisines. Pendant ses explorations du détroit de Waigat, son attention fut attirée, près d'Assuk (à environ 100 milles d'Ovifak), par la couleur ocracée

de quelques blocs roulés de basalte ; mais il n'y trouva pas de fer métallique, comme il l'espérait. En passant sur le promontoire voisin, où la dolérite a disloqué une couche de charbon, il fut frappé par les caractères particuliers de ce basalte et en détacha des fragments qu'il rapporta à Copenhague. En les examinant, il trouva qu'ils étaient remplis de fer natif. M. Steenstrup en a donné un dessin qui est reproduit dans son Mémoire.

C'est une section de dolérite grossie 150 fois, et montrant des particules de fer et des microlites incolores de feldspath et d'augite.

Possédant, grâce à l'auteur de cette découverte, un petit échantillon de la dolérite d'Assuk, je l'ai étudié chimiquement et lithologiquement. Elle est d'un grain serré et le métal n'y est pas toujours visible à l'œil nu. Quant à la composition, la roche diffère peu de celle d'Ovifak et renferme :

Silice	54,80
Alumine	13,40
Protoxyde de fer	14,02
Chaux	7,84
Magnésie	5,33
Soude et potasse	2,18
Nickel	0,08
Cobalt (réaction trop faible pour qu'on l'ait dosé).	
Eau	1,50

Lorsqu'on polit une surface de cette dolérite et qu'on l'examine au microscope, on y voit des particules brillantes qui consistent en fer natif, ainsi que le démontre l'addition d'une goutte de sulfate de cuivre, dont le métal est immédiatement précipité sur les grains.

Les lithologistes familiers avec l'étude des roches de ce genre considèrent cette dolérite comme une des plus intéressantes qu'ils aient jamais observées. Les parti-

cules de fer sont plus arrondies et moins anguleuses que dans la dolérite d'Ovifak, et beaucoup d'entre elles consistent en petits globules sans aucune bordure, mais environnés immédiatement, au contraire, par les cristaux de plagioclase, qui est sans doute le labradorite mêlé peut-être d'oligoclase.

La structure fluidale est très-marquée, et les microlithes de plagioclase offrent une magnifique disposition d'écoulement autour des grands cristaux d'augite. Cette structure est très-commune dans le basalte récent. En décrivant ces sections, je dois remercier M. Steenstrup de m'avoir donné l'idée de déposer du cuivre sur l'une des surfaces avant de la fixer sur la lame de verre, car, par ce procédé, la présence du fer est rendue plus apparente et ne peut être confondue avec celle d'aucun autre minéral ayant l'éclat métallique.

27. Une autre découverte importante fut faite dans le voisinage de la même localité par le même explorateur : je veux parler d'un énorme bloc de pyrite nickelifère dans un dyke de basalte, à Igdlokungoak.

Cette masse minérale avait 200 pieds cubes et un poids d'environ 28000 kilogrammes. Sa densité est de 4,391, et son analyse donne :

Soufre	36,85
Fer	53,01
Cuivre	2,43
Nickel	3,11
Cobalt	0,78
Phosphore	0,42
Résidu insoluble	3,20
	99,38

En outre, on observe des traces d'alumine, de magnésie et de chaux.

28. *Fer spathique.* — Du fer spathique transparent

et d'un jaune pâle est associé à la pyrrhotine d'Igdlokungoak ; il est très-cristallin et possède tous les caractères de la sidérose.

V. — *Autres prétendues météorites du Groënland et couteaux fabriqués par les Esquimaux avec du fer natif.*

29. Il faut examiner maintenant divers échantillons de fer natif trouvés le long de la côte du Groënland septentrional. Leurs localités exactes sont marquées sur la Carte (*Pl. I*) et sont au nombre de huit :

1° Sowallicks, 76° lat. N. ...	Ross, 1818;
2° Fiskernäs, 63°..........	Rink, 1857;
3° Niakornak, 69°16'.......	Rink, 1847;
4° Baie de Fortune, 69°15'..	Rudolph, 1852;
5° Jacobshavn, 69°14'.......	Pfaff, 1870;
6° Ovifak, 69°20'.........	Nordenskjöld, 1870;
7° Assuk, 70°5'...........	Steenstrup, 1872;
8° Ritenbenk, 69°35'.......	Gieseche, 1808-1813;

Nous pouvons ajouter :

9° Igdlokungoak, 69°58'....	Steenstrup, 1872.

où a été trouvé, comme nous l'avons dit, un énorme bloc de pyrite nickelifère.

30. Le fer de Sowallicks présente un grand intérêt par sa comparaison avec le fer d'Ovifak.

L'attention de Ross et de ses compagnons fut attirée par la vue d'une sorte de couteau grossier dans les mains des naturels. Il était fabriqué de petites pièces de fer aplati, d'environ 1 centimètre de diamètre, fixées dans une rainure pratiquée le long d'un os et formant plutôt une scie irrégulière qu'un couteau. Les naturels dirent que le fer venait d'une colline près de Sowallicks, où il y en avait deux

grosses masses ayant chacune 2 ou 3 pieds cubes. L'une d'elles était trop tenace pour qu'on pût la briser, mais l'autre contenait, outre le métal, une roche noire plus facile à rompre. C'est en la brisant que de petits morceaux de fer étaient obtenus. On les aplatissait pour s'en servir de la façon qui a été décrite.

Dans cette description incomplète, nous ne pouvons manquer de reconnaître une ressemblance entre les masses de Sowallicks et celles d'Ovifak. Le fer fut analysé par Brandes, qui trouva qu'il contenait 3 pour 100 de nickel; mais il ne donna pas d'autres détails sur sa composition, et il serait intéressant de voir s'il contient du carbone combiné.

31. J'ai examiné trois des autres fers, c'est-à-dire ceux d'Ovifak, d'Assuk et de Niakornak. Le résultat, relativement aux premiers, a déjà été donné. Le fer de Niakornak est presque semblable à certains échantillons d'Ovifak, quant aux caractères extérieurs. Il se pulvérise aisément, dans le mortier, en petits grains à surface brillante comme du plomb de chasse. La densité de ces particules est de 7,60. Son analyse donne les résultats suivants :

		Ovifak.
Fer	92,45	93,16
Nickel	2,88	2,01
Cobalt	0,43	0,80
Cuivre	0,18	0,12
Phosphore	0,24	0,32
Soufre	1,25	0,41
Chaux, magnésie	traces	»
Carbone (combiné)	1,74	2,34
Silice	1,31	»
	100,48	

On dosa le carbone en traitant le fer pulvérisé par le chlorure double d'ammonium et de cuivre, et le carbone

hydraté ainsi obtenu pesa 2,90 qui, multiplié par 0,60, donna la vraie proportion du carbone combiné. En comparant cette composition avec celle des particules de fer d'Ovifak, on voit qu'elle s'accorde parfaitement avec elle. Parmi les particularités, nous appellerons l'attention sur la proportion considérable de cobalt par rapport au nickel trouvé à la fois dans le fer d'Ovifak et dans celui de Niakornak. Le fer de Niakornak a été trouvé par M. Rink, en 1847, en possession de quelques Groënlandais, qui déclarèrent l'avoir trouvé dans une plaine couverte de galets, près de l'embouchure de la rivière Annoritok; cette association avec des galets est une autre analogie avec le fer d'Ovifak.

32. Le fer de Rudolph, qui a été apporté de la baie de Fortune en 1852, est regardé par M. Nordenskjöld comme appartenant aux fers d'Ovifak et provenant originairement de cette localité; je suis, à cet égard, parfaitement d'accord avec lui, car les naturels de la baie de Fortune connaissaient la localité d'Ovifak avant que M. Nordenskjöld la visitât, et, de plus, les caractères des deux masses sont les mêmes.

33. Le fer de Pfaff-Oberg, recueilli par le Dr Pfaff, en 1870, vient de Jacobshavn, distant de quelques milles seulement de Niakornak, et il est sans doute originaire de la même localité, car il a les mêmes caractères. Il a l'aspect d'une masse de grains de fer soudés ensemble et présentant çà et là un silicate noir d'aspect basaltique, et le microscope a révélé que sa structure est la même que celle de la dolérite du Groënland que nous avons examinée. Nous en reconnaissons donc l'analogie avec le fer d'Ovifak.

34. Ainsi donc nous voyons que tous les fers natifs du Groënland sont semblables entre eux, quant à leur nature et à leur composition.

VI.—*Dissemblance entre le fer d'Ovifak et toutes les météorites connues; impossibilité d'expliquer son origine autrement qu'en y voyant un élément constitutif de la dolérite.*

35. M. Nordenskjöld a d'abord été porté à penser que les masses ferrugineuses d'Ovifak faisaient partie d'une grande météorite de 6 à 12 mètres de diamètre, formée principalement d'une masse analogue au basalte, avec des grains de fer disséminés dans son intérieur; mais il regarda bientôt cette hypothèse comme trop hasardée, parce que le basalte qui avoisine le fer est parfaitement semblable au basalte du pays. Il supposa alors que la chute était entièrement métallique et qu'un essaim de fer météorique était tombé dans une nappe ou un filon de basalte pendant qu'il était liquide ou pâteux. Cette dernière théorie a été quelque peu modifiée à la suite des observations de MM. Nauchkoff, Tschermak et d'autres, qui revinrent aux suppositions premières de M. Nordenskjöld, c'est-à-dire « supposèrent que plusieurs fragments ont résulté de la destruction d'un grand corps cosmique d'une nature bréchoïde, consistant en partie en fer et en partie en une brèche eukritique ». La valeur de cette théorie peut maintenant être discutée à la lumière des faits fournis par ce Mémoire.

36. Les analogies entre les masses de fer d'Ovifak et les météorites sont au nombre de deux. La première, qui n'a que peu ou pas d'importance, est relative à la forme des gros blocs recueillis sur la grève par M. Nordenskjöld.

L'autre, pourvue, au contraire, d'une signification considérable, est l'association du nickel et du cobalt avec du fer métallique.

Il ne faut pas perdre de vue que l'on ne possède pas, jusqu'ici, de fer natif terrestre authentique en masses aux-

quelles nous puissions comparer les blocs groënlandais. Nos termes de comparaison doivent être pris parmi les minerais de fer qui appartiennent aux roches sédimentaires et métamorphiques; mais, si nous admettons que le fer d'Assuk est d'origine terrestre (et je ne vois pas comment la chose peut être douteuse après la description du gisement donné par M. Steenstrup), la présence du nickel et du cobalt perd une grande partie de sa signification, car nous avons vu que ce fer en renferme.

Nous savons, d'ailleurs, que le fer métallique a été trouvé dans les basaltes comme dans celui de la côte nord-est d'Irlande par M. Andrews (de Belfast), dans celui du New-Hampshire, par M. Hawes, et dans ceux de deux ou trois autres localités. Dans aucun de ces cas on n'a recherché le nickel.

37. Les dissemblances entre les fers groënlandais et les fers météoriques sont très-nombreuses :

1° La croûte durcie d'oxyde de fer ne ressemble en rien à celle d'aucune météorite connue, et sa structure est différente. Si nous examinons l'intérieur d'une masse de vrai fer météorique, nous trouvons un métal compacte. Il est vrai qu'il existe quelques fers météoriques qui se décomposent et tombent en fragments, mais on n'a pas remarqué que la désagrégation allât de l'intérieur à l'extérieur; au contraire, quand l'extérieur est en décomposition complète, l'intérieur de la masse est encore formé de fer solide et compacte.

Dans le cas des masses de fer d'Ovifak, l'extérieur est solide et dur, et, en les brisant, on passe à un magma interne; or, nous ne saurions trouver rien d'analogue chez les météorites.

2° Les lingots métalliques eux-mêmes, qui n'ont pas subi une décomposition, ont un tel degré de fragilité (non produite par une oxydation ou une décomposition partielle), que l'on peut facilement les pulvériser dans un mortier.

Dans le cas de fragments de vrai fer météorique, qui peuvent être plus ou moins broyés de la même manière, on trouve toujours que les échantillons ont été profondément altérés et oxydés par les agents atmosphériques, et quand on arrive au fer non altéré, il n'est pas broyé, mais écrasé, différence qui tient à une tout autre composition de ces masses.

3° Les blocs de fer furent trouvés, comme on sait, en contact immédiat avec les roches du pays et même adhérents avec elles, et non pas simplement collés dessus par quelque substance intermédiaire. Pour nous rendre compte de cette particularité, il faut laisser de côté les gros blocs oxydés et étudier les particules intactes dans la dolérite compacte. Tout prouve que les unes et les autres ont la même origine. L'importance de l'association de la dolérite avec le fer a été signalée plus haut, et je me réfère à ce qui a été dit à cet égard.

Il est utile de revenir ici sur les explications d'abord proposées par M. Nauchkoff, et ensuite développées par M. Tschermak, pour rendre compte de la présence du fer métallique dans le basalte. Comme nous l'avons dit (35), ces savants pensent que la roche immédiatement voisine du métal est différente de la dolérite, et ils en font la vraie gangue du fer, qui se serait fait un chemin dans la dolérite basaltique pendant la période où celle-ci était de consistance pâteuse. En d'autres termes, ils admettent qu'une masse cosmique de pierre contenant du fer est tombée dans le basalte pendant qu'il était liquide ou pâteux, et, pour donner plus d'apparence à cette supposition, ils émettent l'avis que cette pierre cosmique est du même type que les météorites eukritiques ([1]), comme celles

([1]) Rose ayant appliqué le nom d'*eukrites* aux météorites pierreuses consistant essentiellement en un mélange d'anorthite et d'augite (*Acad. de Berlin*, 7 août 1862 et janvier 1863).

de Juvinas, de Jonzac, de Stannern, de Petersburg, de Shergotty et de Frankfort en fournissent les exemples les mieux connus. Même en acceptant que la détermination lithologique soit exacte (ce qui n'est pas, comme on le verra un peu plus bas), il n'y aurait aucune force dans cette déduction, car les tufs et les laves eukritiques ont bien plus souvent une origine terrestre qu'une origine météoritique; de plus, la dolérite eukritique n'a pas encore été trouvée dans une météorite bien authentique. Des dykes et des nappes de basalte plus ou moins eukritiques sont bien connus, et d'immenses couches de lave et de tufs eukritiques existent en Islande et ailleurs.

M. Tschermak attache néanmoins beaucoup d'importance à ce fait que l'examen de M. Nauchkoff prouverait que la gangue doléritique diffère du basalte environnant et, à quelques égards, ressemblerait, par la composition, aux météorites à anorthite; il ajoute que la troïlite est de composition analogue à celle des météorites.

« Je crois, dit-il, qu'il faut regarder comme acquis qu'un essaim de météorites, composées d'eukrite, de fer et de troïlite, a été projeté dans le basalte alors que celui-ci était encore dans un état de fusion. Dans la gangue dont il s'agit, le fer, l'eukrite et la troïlite reproduisent à peu près la composition des météorites connues, mais seulement à peu près, une identité complète ne s'étant montrée dans aucun cas. Le fer, aussi bien que l'eukrite et la troïlite, se montre tout à fait différent de tout ce qui a été trouvé dans les météorites. »

M. Tschermak admet aussi que la présence de la magnétite et du graphite, qui n'a pas lieu dans l'eukrite météoritique est une particularité notable des pierres d'Ovifak, et qu'à ce point de vue la comparaison avec les eukrites météoritiques ne peut être soutenue. Il ajoute que la structure de l'augite qui se présente dans les deux gisements est très-différente, et que dans la pierre d'Ovifak elle est très-

semblable à celle des dolérites et des diabases; et il conclut néanmoins « que la constitution intime des pierres d'Ovifak ne montre rien qui soit en contradiction avec les précédentes observations sur les météorites, si ce n'est que l'augite ressemble à celle des roches terrestres ». Et il croit que « l'opinion d'une origine tellurique doit être mise de côté, à cause de ce fait que le fer nickelifère, comme élément de roches terrestres, n'a jamais été observé seul ou associé avec la troïlite et le graphite. Par conséquent, mon avis à moi (Tschermak) est qu'un soigneux examen de toutes les circonstances conduit à conclure que les masses découvertes à Ovifak ont une origine météoritique. » Comme cette manière de voir est répandue parmi ceux qui étudient l'origine de ce fer, je vais résumer les points sur lesquels elle s'appuie, en parlant de ce que mes observations m'ont procuré.

38. Les faits sur lesquels j'insisterai ont été fournis par l'examen des parties internes des échantillons où ils avaient le moins possible subi d'altérations de la part des causes extérieures, et où les petits granules de fer étaient hermétiquement enveloppés par la roche.

Déjà j'ai montré qu'il n'y a pas de motif plausible pour conclure de la présence du fer dans une eukrite à l'origine météoritique. Voyons maintenant s'il y a une raison de supposer que l'eukrite peut envelopper les particules de fer. A cet égard, je renvoie au résultat des expériences chimiques que j'ai faites, où il a été nettement démontré que l'anorthite fait défaut dans les roches à fer natif [1]. On se rappelle que les essais ont montré qu'un feldspath à base de chaux n'était pas dissous, ce qui eût eu lieu si de l'anorthite avait existé; et les observations microscopiques ont porté à croire, par comparaison avec la dolérite bien connue, que le feldspath est le labradorite.

---

[1] Excepté comme cristaux rares et détachés.

Afin de comparer directement une eukrite météoritique avec la partie de la dolérite d'Ovifak qui enveloppe le fer, les expériences comparatives furent exécutées avec un fragment de la pierre météorique de Juvinas, et la chaux fut abondante pour la pierre météorique, et seulement à l'état de trace pour la dolérite.

J'ai aussi pris une mince lame du même échantillon de basalte préparée pour le microscope, et, après l'avoir collée sur du verre, je l'ai plongée dans l'acide chlorhydrique. Après vingt-quatre heures, la lame de verre fut retirée sans déranger la section. Le fer et une partie des silicates étaient dissous, mais les cristaux prismatiques du feldspath étaient inattaqués. S'ils avaient été formés d'anorthite, ils auraient été décomposés.

Mes résultats sont un peu plus qu'une confirmation des essais analogues faits par M. Steenstrup; ils sont un peu mieux élaborés et plus critiques.

Mais l'argument le plus décisif pour montrer que le fer n'a apporté aucune gangue spéciale dans le basalte est fourni par le gisement d'Assuk. Ici, comme je l'ai montré précédemment, la roche est uniformément une dolérite à grains fins avec une structure fluidale, et les petites particules de fer, dont beaucoup sont microscopiques, sont insérées comme des gouttes au milieu des cristaux de labradorite et d'oligoclase.

Par conséquent, non-seulement la présence de l'eukrite autour des fers d'Ovifak n'est pas prouvée, mais encore l'examen direct fait voir que le fer *est, dans une dolérite basaltique terrestre, associé avec du feldspath labradorite.*

39. Maintenant, passons à la *troïlite*. Jusqu'ici nous avions de bonnes raisons de penser que ce minéral n'existait que dans les masses cosmiques, et sa présence est un motif de soupçon sur l'origine météoritique du corps où on le trouve. Mais, pour le cas en question, la présence de la

troïlite est douteuse et mes propres observations ne fournissent, comme on l'a vu, aucune raison de penser que le sulfure soit de la troïlite; au contraire, je suis décidément d'avis qu'il n'en est pas, conclusion qui est appuyée par ce qui a été dit précédemment.

Avec nos connaissances actuelles sur ce sujet, il ne peut y avoir de plus grande anomalie que de la troïlite météoritique associée avec un silicate hydraté, contenant plus de 12 pour 100 d'eau, et qui, débarrassé autant que possible de ce silicate, contient encore de l'eau qu'on a reconnue directement. A ceci il faut ajouter le fait qu'un semblable sulfure se présente dans l'île de Disko, à une grande distance d'Ovifak, notamment la masse de 200 pieds cubes près d'Igdlokungoak. *Au lieu d'appartenir à la troïlite, nous regardons ce sulfure comme étant une variété de pyrrhotine nickelifère.*

40. J'arrive à une différence très-nette entre le fer d'Ovifak et le fer météorique : c'est la grande proportion de carbone combiné trouvé dans le premier. Je dois dire que je n'ai jamais eu occasion de penser qu'aucun fer météorique que j'ai examiné contienne la moindre quantité de carbone combiné ([1]). M. Mohr, dans des recherches sur les fers météoriques, etc. ([2]), en examine un grand nombre au point de vue du carbone combiné, et il ne peut en déceler la plus petite quantité. Ses expériences nous sont données dans le plus grand détail, et sa méthode paraît très-sûre. Sa conclusion générale est qu'un fer météorique ne contient jamais de carbone combiné. Je ne suis cependant pas en état de généraliser ce fait autant que lui, car nous devons être prudents dans nos généralisations, relativement

---

([1]) J'ai décrit dans le temps (*Am. Journ. of Science*, 2e série, t. X, p. 153) un fer de Campbell County (Tennessee), comme contenant du carbone combiné, mais j'ai trouvé depuis que ce fer est d'origine terrestre et contient dans ses crevasses des parcelles de charbon de bois.

([2]) *Annalen der Chemie und Pharmacie*, décembre 1875.

aux constituants chimiques et aux associations de matériaux de notre univers ([1]).

41. Un fait intéressant, en rapport avec les autres propriétés de plusieurs de ces échantillons, c'est que des lignes brillantes anguleuses, dendritiques et circulaires, sont développées par l'eau-forte sur les surfaces polies des fers groënlandais. Dans plusieurs des échantillons, ces figures se voient sur les surfaces polies, même sans le secours de l'acide, surtout quand la proportion de basalte est considérable. Sont-ce des figures de Widmannstætten? Nous savons que les fers météoriques diffèrent les uns des autres, quant à la nature de ces figures; elles se présentent, dans la plupart des fers, avec des formes régulières, les lignes et les espaces variant beaucoup en dimension d'un échantillon à l'autre. Nombre de fers météoriques ne donnent pas ces figures; certains d'entre eux montrent simplement des points, d'autres n'ont aucune caractéristique marquée, pendant que d'autres donnent lieu à des taches irrégulières que M. Stanislas Meunier ([2]) a récemment regardées comme indiquant une espèce de structure clastique dans le fer. Avec cette définition vague de ce qu'il faut comprendre par *figures de Widmannstætten*, nous pouvons classer les figures du fer d'Ovifak dans cette catégorie, quoique je sois persuadé que la cause qui les produit soit très-différente de celle qui détermine celles de Toluca et des fers semblables.

Il faut ici rapporter quelques-uns des intéressants résultats obtenus par M. Daubrée dans ses expériences synthétiques sur les météorites ([3]). Dans la partie de ses

---

([1]) Je suis porté à penser que les concrétions nodulaires des fers météoriques contiennent du carbone amorphe, à supposer que ce ne soit pas du carbone combiné avec le fer. J'ai, dès maintenant, commencé des recherches sur ces concrétions, mais je ne puis espérer de les finir avant plusieurs mois.

([2]) *Comptes rendus*, avril 1878.

([3]) *Comptes rendus*, t. LXII, p. 371; 1866.

recherches relative aux figures de Widmannstætten, il fondit ensemble 2 kilogrammes d'un mélange de fer, de nickel, de phosphure de fer et de sulfure de fer, et, après refroidissement, il polit et traita le fer par un acide. Une surface hachée fut ainsi obtenue et, « au milieu de dessins dendritiques d'une régularité très-remarquable, on aperçut alors la matière brillante, isolée et comme repoussée dans les interstices sous une forme réticulée », tout à fait comme nous voyons les figures dans le fer d'Ovifak.

42. Avant de terminer cette partie de notre travail, il est important d'ajouter quelques-unes des remarques que M. Daubrée a placées dans son Mémoire déjà cité, car personne n'a étudié la question plus soigneusement que lui. Il pensa d'abord que les fers étaient probablement météoritiques ; mais un examen subséquent ajouté aux résultats de ses dernières études sur la synthèse des météorites le porta à douter de l'exactitude de sa première conclusion. Sans cependant, que je sache, s'être encore formé une opinion définitive, il dit ([1]) : « D'abord leur composition, ainsi que certains traits physiques, les distingue des types de météorites jusqu'à présent connus.

» .... L'examen au microscope, ou même à la loupe, d'une plaque mince et transparente, montre d'une manière très-nette des cristaux incolores, minces et allongés, maclés suivant des plans parallèles et appartenant à un système doublement oblique, de manière à produire, par leur juxtaposition sur l'action de la lumière polarisée, tout à fait la même disposition que les cristaux de labradorite de certaines dolérites.

» .... La présence et l'abondance du carbone dans ces masses, tant combiné qu'à l'état libre, constitue un autre fait non moins remarquable. Par ces deux derniers caractères, les roches d'Ovifak se rapprochent des météo-

([1]) *Comptes rendus*, t. LXXIV, p. 1546 ; 1872.

rites dites *charbonneuses ;* cependant elles en diffèrent par d'autres caractères et avant tout par leur aspect, soit dans la partie métallique, soit dans les parties silicatées ([1]). »

M. Daubrée dit, dans ses dernières recherches, que la question relative à l'origine cosmique ou tellurique des roches à fer natif d'Ovifak n'est pas encore résolue avec certitude, quoiqu'elle ait été l'objet d'un grand nombre de recherches faites sur le terrain et dans le laboratoire. Cette incertitude, dit-il, est la meilleure preuve de la ressemblance qui unit les roches profondes de notre globe avec les roches extra-terrestres qui nous sont parvenues des espaces; mais je pense que M. Daubrée reconnaîtra que beaucoup des difficultés qui s'opposaient à l'admission de l'hypothèse terrestre, quant à l'origine du fer et du basalte, sont aplanies dans ce Mémoire.

VII. — *Si le fer est terrestre, quelle est son origine? Est-ce un produit primaire ou secondaire des roches?*

43. Dans mon opinion, j'ai la pleine assurance que le fer est un produit secondaire.

C'est un fait bien connu que les injections basaltiques, au travers des roches sédimentaires, ont souvent été modifiées par celles-ci.

En 1842, M. Percival ([2]) observa que le trapp de l'État de Connecticut, où il a traversé, en certains endroits, des schistes secondaires, s'est imprégné de bitume durci. C'est ce qu'on trouve dans plusieurs localités. Partout où des dykes de trapp traversent des roches stratifiées, il est

---

([1]) Je n'ai trouvé aucune indication de la présence de la schreibersite, si ce n'est que nous trouvons du phosphore dans le basalte et dans le fer, constituant commun dans les roches terrestres et les minerais de fer.

J.-L. S.

([2]) *Report of the geology of the State of Connecticut*, 1842, p. 315 à 320 et 382.

plus naturel de s'attendre à ce qu'il détermine l'altération des couches au contact desquelles il se trouve, qu'il ne l'est de penser qu'il puisse entraîner avec lui des fragments de ces couches.

Ceci posé, appliquons ces observations à l'énorme éruption de roches basaltiques du Groënland septentrional, et spécialement de divers points de l'île de Disko et de la côte. Là, nous voyons la roche éruptive traversant les lits miocènes, pleins de débris végétaux et de grands dépôts de lignite, chauffant d'une manière intense ces matières charbonneuses, et engendrant de grandes quantités de gaz hydrocarboné, agents puissamment réducteurs qui doivent nécessairement agir sur les constituants du basalte fondu. De plus, les masses de basalte fondu doivent entraîner avec elles des parties des matières charbonneuses solides qui, elles aussi, exercent leur pouvoir réducteur. Par conséquent, il n'est pas surprenant que l'oxyde de fer du basalte, qu'il soit ou non combiné à la silice, subisse la décomposition et fournisse du fer métallique contenant une notable quantité de carbone combiné, et qu'une autre partie du charbon ait été convertie en graphite, comme nous en avons rencontré dans les roches.

Quoique les constituants, tels que le soufre et le phosphore, aient surtout été constatés en combinaison avec le fer, nous devons cependant nous attendre à retrouver ces corps dans le basalte lui-même. A cet égard, je rappellerai seulement ce que d'autres ont dit, et surtout M. Daubrée, qui cherche de quelle façon le fer a pu se former, s'il est terrestre, quoiqu'il ne soit pas disposé, comme on l'a vu, à adopter cette opinion d'une manière absolue.

Ses résultats fournissent un tel appui à mon opinion, que je les rapporte dans les termes mêmes employés par l'auteur.

(¹) *Comptes rendus*, t. LXII, p. 371.

« Une troisième méthode expérimentale consiste à réduire, par fusion, dans un creuset brasqué, certaines roches terrestres, comme le péridot, la lherzolite, l'hypersthène du Labrador, le basalte et le mélaphyre de diverses localités. Je suis également arrivé par cette manière à la production du fer, très-analogue au fer météorique, tant par la composition que par la structure, notamment en me servant de la lherzolite de Prade, et il est digne de remarque que ces derniers fers contiennent des quantités très-notables de *nickel,* de même que le fer météorique. Ces mêmes fers sont en outre, dans beaucoup de cas, mélangés de phosphure de fer, comme les pierres météoriques. La plupart des roches éruptives, et surtout les roches basaltiques, renferment des phosphates, soit qu'on y aperçoive ces petites aiguilles d'apatite sur lesquelles M. Gustave Rose a appelé depuis longtemps l'attention, soit que l'analyse chimique seule puisse constater la présence du phosphure de fer dans la masse métallique obtenue (¹). »

M. Terreil analysa quelques-uns des fers extraits par M. Daubrée du péridot de la lave basaltique de Langeac, et trouva qu'ils étaient composés comme il suit :

Densité : 6,955

Fer	89,96
Manganèse	0,66
Chrome	1,66
Nickel	1,16
Cobalt	traces sensibles
Cuivre	0,11
Carbone combiné	1,73
Carbone libre	2,61
Silicium	2,30
Soufre	traces.

(¹) *Comptes rendus,* t. LXXXIV, p. 70; 1877.

Comparons-les avec la composition du fer provenant d'Ovifak :

	Produit artificiel.	Fer d'Ovifak.
Fer	89,96	88,23
Nickel	1,66	2,13
Cobalt	traces sensibles	1,07
Cuivre	0,11	0,48
Soufre	traces	0,36
Carbone combiné	1,73	2,33
Carbone libre	2,61	»
Silicate	»	4,20
Silicium	2,30	»

De ces faits il restera évident pour tout le monde que, par l'action réductrice du carbone, le fer peut se séparer de la dolérite d'Ovifak et renfermer du nickel allié au fer sans que ce soit un argument pour croire qu'il dérive d'une source extra-terrestre.

Le basalte fondu, injecté au travers des lits de lignite et d'autres matières végétales, se trouve dans la même condition que s'il était fondu dans un creuset brasqué.

Comme complément, nous remarquerons que, quoiqu'il y ait plus de 1000 milles de côtes depuis la pointe sud du Groënland jusqu'à l'île de Disko (et plusieurs milliers en comptant les îlots), comprenant cette partie du Groënland qui a été le plus complétement explorée, cependant le fer natif n'a pas été trouvé dans toute cette étendue de pays (sauf le petit fragment que M. Rink a recueilli à Fiskernäs et dont on ignore la localité originaire).

En second lieu, le fer ne se trouve pas *in situ* tant qu'on n'arrive pas à la formation basaltique, qui commence vers le 69ᵉ degré de latitude nord et se montre en gigantesques dykes et nappes, qui s'étendent sans interruption jusqu'au 76ᵉ degré ; là elle disparaît sous l'immense glacier de

cette région. Nous ne saurons peut-être jamais de combien elle s'étend encore vers le nord, mais ce qui se montre représente une côte ininterrompue de basalte aussi longue que la distance qui sépare Gibraltar de Brest.

C'est dans les régions les plus méridionales de cette contrée basaltique, dans l'île de Disko et le long du détroit de Waigat, que le fer natif a été trouvé le plus abondamment. Il est également vrai que la formation basaltique y a été plus complétement étudiée, et il est permis de supposer que, guidé que l'on est maintenant par une méthode de recherche, on retrouvera du fer natif semblable dans les autres localités comprises entre les 69e et 76e degrés de latitude. Tout le fer trouvé le long de la côte est sans doute de la même origine, c'est-à-dire provient du basalte.

44. Pour résumer en peu de mots la conclusion à laquelle je suis arrivé relativement à l'origine du fer natif d'Ovifak, je dirai que ce fer ne provient pas des grandes profondeurs qui sont les sources du basalte lui-même, que cette roche a pénétré (à l'état fondu) les lits chargés de matières organiques, où le charbon a réagi sur elle et a séparé le fer des silicates ferrugineux. Si nous admettons que les sulfures aient fait éruption avec la roche (ce qui n'est pas probable), ils pourraient aussi avoir été réduits avec le concours de la vapeur d'eau, qui était nécessairement présente durant l'éruption.

Comme conclusion, je dirai que j'ai fait tous mes efforts pour réunir tous les faits d'observation recueillis sur les points où les fers se présentent, et toutes les recherches relatives aux soi-disant météorites rapportées de ces localités, celles-ci ayant été étudiées minéralogiquement et chimiquement. Les résultats sont de nature, j'en ai la conviction, à ébranler, sinon à détruire entière-

ment chez ceux qui s'intéressent à ces questions, l'opinion que les fers d'Ovifak sont d'origine météorique.

Toutes mes observations microscopiques ont été confirmées par MM. Des Cloizeaux, Fouqué et Michel Lévy; ils considèrent que la dolérite contenant le fer a les caractères de l'ophite des Pyrénées, que le feldspath, dans la masse contenant le fer (et souvent pénétrant le fer), est une pseudo-microlithe, très-allongée suivant $p - g^1$, faisant disparaître la lumière polarisée à un angle qui n'excède pas 30 degrés, et caractéristique du labradorite. La microlithe d'Assuk se compose de plusieurs feldspaths, principalement de labradorite et d'oligoclase. Ils ont trouvé qu'un ou deux des nombreux échantillons de la dolérite d'Ovifak qu'ils ont examinés, et qui ne contenaient pas de fer, montraient quelques cristaux d'anorthite, et qu'un échantillon venant d'une localité voisine d'Ovifak contient des cristaux plus nombreux du même feldspath. Ils sont d'avis que la dolérite et le fer sont, sans le moindre doute, d'origine terrestre.

Au moment où ce Mémoire est sous presse, je reçois une lettre de M. G. Lindström, de Stockholm, qui m'annonce que M. A.-E. Törnebohm, géologue suédois, après un travail très-soigné sur les roches d'Ovifak, est convaincu aussi que le fer est d'origine terrestre.

Les dessins des observations microscopiques devant accompagner ce Mémoire étaient terminés; mais, comme ils ont déjà été donnés par M. Steenstrup et par M. Törnebohm, et qu'ils n'ajouteraient rien à l'appréciation des faits, je les ai supprimés.

SUR LA CONSTRUCTION DE LA RÈGLE GÉODÉSIQUE INTERNATIONALE;

PAR MM. H. SAINTE-CLAIRE-DEVILLE ET É. MASCART.

Mémoire lu, par H. Sainte-Claire Deville, à la Réunion de l'Association géodésique internationale à Hambourg, le 5 septembre 1878.

La mission que vous avez bien voulu me confier, de faire fabriquer en platine iridié la règle géodésique internationale, serait aujourd'hui tout à fait remplie, si je n'avais cru devoir répondre à votre confiance par un travail complet sur les propriétés physiques et chimiques de cette règle et par la recherche d'une méthode capable d'en déterminer la permanence ou la variation avec le temps.

La partie physique et chimique de ce travail est terminée : je vais vous en rendre compte tout d'abord.

La règle géodésique a été préparée par MM. Johnston, Matthey, de Londres, avec du platine et de l'iridium purs. Les métaux ont été fondus ensemble un grand nombre de fois. L'homogénéité parfaite du lingot a été constatée par des déterminations nombreuses de densité et des analyses dont les résultats ont toujours été concordants, sur quelque point de sa masse qu'aient été prélevés les échantillons.

Voici les détails de cette fabrication, donnés par M. G. Matthey lui-même :

« Le platine et l'iridium qui entrent dans la composition de cette règle ont été préparés par les procédés de MM. H. Sainte-Claire Deville et Debray; ils ont été, préalablement à leur fusion, analysés dans leur laboratoire.

» On procéda à la fonte des matières en opérant chaque fois sur

Platine	450 onces.
Iridium..........................	55 »

» Cinq lingots ainsi préparés furent coupés en petits fragments au moyen de la presse hydraulique. Ces fragments furent ensuite fondus ensemble dans le même fourneau et longtemps maintenus à l'état liquide par le feu du gaz de l'éclairage et de l'oxygène.

» Le nouveau lingot fut forgé (la panne du marteau-pilon et l'enclume étaient en acier poli et constamment frottées), puis laminé; les lames, bien décapées, furent encore fondues dans un four parallélépipédique et donnèrent une masse métallique paraissant très-homogène, sans aspérités, sans crevasses, tout aussi bien sur le fond que sur les côtés et à la surface. Après un premier forgeage, on obtint une barre de 35 centimètres de longueur, de $7^c,5$ de largeur et de $2^c,5$ d'épaisseur, qui pesait

Dans l'air.	$15^{kg},105$
Dans l'eau à 70 degrés F.	$14^{kg},405$

ce qui donne une densité à zéro de 21,523.

» Un tiers de la barre fut coupé, et les deux autres tiers, forgés et fortement écrouis, avaient les dimensions suivantes : 95 centimètres de longueur, $2^c,5$ de largeur et 2 centimètres d'épaisseur. Le barreau pesait

Dans l'air.	$10^{kg},814$
Dans l'eau à 60 degrés F.	$10^{kg},315$

Sa densité à zéro était de 21,635 [1].

» Le barreau fut laminé sous des cylindres polis et amené à très-peu près à la dimension requise, 5 millimètres d'épaisseur sur 21 millimètres de largeur ($4^m,10$ de longueur). Enfin la forme parfaitement rectangulaire fut

---

[1] Ces pesées ont été faites avec une balance d'une exactitude douteuse, avec des poids anglais et français dont il est difficile de répondre, ce qui explique un résultat aussi élevé, 21,635, qui n'est pas impossible, mais paraît cependant trop fort.

donnée à la règle en la faisant passer plusieurs fois à travers le même trou d'une filière en acier.

» A chaque passe on a recuit la règle à la plus haute température, au moyen d'un très-grand chalumeau à gaz alimenté par de l'oxygène, et on l'a fait passer plusieurs fois par le même trou de la filière, en la chauffant chaque fois, jusqu'à ce qu'elle n'y subît plus de pression et qu'elle n'acquît plus d'allongement sensible. Après chaque passe, soit sous le marteau-pilon, soit sous le laminoir, soit au travers de la filière, la matière, chauffée soit dans un grand moufle en platine, soit au chalumeau, était décapée par du borax fondu et de l'acide chlorhydrique concentré. »

Le platine iridié de la règle géodésique préparée par M. Matthey a été pour moi le sujet d'une étude attentive, dont je donnerai les principaux résultats :

1° Un petit lingot fondu, pris dans la masse fondue, pesait

Dans l'air.....	310gr,849
Dans l'eau à 18 degrés...........	296gr,424

Sa densité à zéro est donc 21,508.

2° Une masse parallélépipédique pesait

Dans l'air.......................	116gr,898
Perte dans l'eau à 4 degrés.......	5gr,429

Sa densité était donc 21,510.

Il en résulte que la matière, recuite à très-haute température, a repris sensiblement la densité du métal fondu.

3° Son analyse, faite sur deux échantillons pris aux deux extrémités de la règle, a donné :

	I.	II.
Platine..................	89,40	89,42
Iridium	10,16	10,22
Rhodium	0,18	0,16
Ruthénium................	0,10	0,10
Fer......................	0,06	0,06
	99,90	99,96

On en déduit :

	Proportions.	Densité à zéro.	Volume.
Platine iridié à 10 pour 100..	99,33	21,575	4,604
Iridium en excès...........	0,23	22,380	0,010
Rhodium	0,18	12,000	0,015
Ruthénium................	0,10	12,261	0,008
Fer......................	0,06	7,700	0,008
	99,90		4,645

Densité à zéro calculée d'après l'analyse I.. 21,507
Densité à zéro calculée d'après l'analyse II.. 21,510

qui concordent parfaitement avec les résultats des analyses.

En fabriquant un pareil alliage avec une telle pureté, M. Matthey a résolu un problème de métallurgie des plus difficiles et des plus compliqués. On ne peut s'imaginer, à moins qu'on ne connaisse dans tous leurs détails les procédés si pénibles employés à la purification de l'iridium et même du platine, combien il a fallu d'intelligence, de patience et de dévouement à la Science pour réussir dans une pareille œuvre. C'est aussi au désintéressement de M. G. Matthey et de ses associés que nous devons d'avoir pu, les premiers, utiliser une matière dont, d'après M. Dumas, « la production enrichit l'outillage scientifique d'un alliage doué de propriétés précieuses ».

C'est aussi l'avis publiquement exprimé par un juge aussi sévère que bienveillant, M. Stas, le célèbre chimiste de Bruxelles, dont le suffrage a été un encouragement précieux pour les habiles fabricants de Londres. Si les membres de l'Association le permettent, je ferai parvenir à M. G. Matthey le témoignage de leur satisfaction.

L'alliage de la règle géodésique est beaucoup plus dur, plus résistant que le platine. Sa rigidité est telle, qu'on ploie difficilement même une lame de 1 à 2 millimètres d'épaisseur. Il présente alors une parfaite élasticité; la

lame ne se ploie que sous un grand effort, revient à sa position primitive, sans changement, à moins que l'angle sous lequel on l'a ployée ne soit un peu grand.

M. Phillips a bien voulu me donner l'expression numérique de ces effets, en déterminant le coefficient d'élasticité du platine iridié de la règle, coefficient qui est considérable, et sa limite d'allongement permanent.

Note sur l'élasticité du platine iridié employé pour la fabrication de la règle géodésique.

La méthode que j'ai employée, et qui est fondée sur la théorie mathématique de l'élasticité (*Annales des Mines*, t. XV, 1869), est la suivante :

La durée d'une oscillation simple d'un balancier mû par un spiral théorique est

$$T = \pi \sqrt{\frac{AL}{M}}.$$

A, moment d'inertie du balancier ;
L, longueur développée du spiral ;
M, moment d'inertie de la section droite du spiral ;
$M = EI$;
E, coefficient d'élasticité ;
I, moment d'inertie de cette section droite, et

$$I = \frac{\pi d^4}{64},$$

d étant le diamètre du fil. On en tire

$$E = \frac{64 \pi AL}{d^4 T^2}.$$

Dans les expériences, le balancier était en laiton et le spiral en platine iridié.

$$A = 0,000014097187,$$
$$L = 1^{m},282,$$
$$d = 0^{m},00070553 ;$$

le diamètre d a été observé en treize points équidistants avec un micromètre de Froment.

On a eu, comme moyenne d'un grand nombre d'expériences,

$$T = 0^s,8181.$$

On en conclut

$$E = 21\,912\,000\,000.$$

La limite d'allongement permanent se tire de la formule

$$i = \frac{d\alpha}{2L}.$$

α, angle d'écartement, après lequel le balancier ne revient pas exactement à sa position primitive;

i, allongement proportionnel correspondant.

On a eu

$$\alpha = 60^o \text{ environ},$$

d'où

$$i = 0,0003 \text{ environ},$$

ce qui, sous ce rapport, classe cet alliage entre le platine, qui est plus déformable que lui, et l'or, qui l'est moins.

Les expériences ont été effectuées, sous ma direction, par M. Rozé, répétiteur à l'École Polytechnique.

H. Phillips.

Il en résulte qu'une règle de platine iridié soutenue par ses deux extrémités ne fléchira, relativement à son poids et à sa longueur, que sous l'influence d'un poids considérable suspendu à son milieu, mais qu'elle ne reviendra plus à sa position primitive si la flèche est un peu forte. Néanmoins, pour la déformer d'une manière permanente, il faudrait un effort considérable.

MM. Brunner frères, qui ont soumis la matière de la règle géodésique à un grand nombre d'actions mécaniques,

m'ont communiqué les résultats de leurs observations.

Paris, ce 27 août 1878.

MONSIEUR,

La division de la règle géodésique, que nous faisons pour l'Association géodésique internationale, est terminée depuis quelques jours.

Nous avons pensé que vous ne seriez pas mécontent d'apprendre que cette opération a parfaitement réussi, et que c'est au métal que nous attribuons la facilité avec laquelle nous avons pu l'exécuter.

Le platine iridié de M. Matthey est incontestablement supérieur au platine ordinaire pour la confection des règles divisées. Il est exempt de ces pailles qu'on rencontre toujours dans ce dernier et se laisse polir au charbon. On peut, sans danger, enlever les rébarbes des traits et les conserver très-beaux. Le platine ordinaire ne peut être poli qu'au papier à émeri, et l'on est toujours exposé à gâter la division quand on procède à l'ébarbage. C'est là un inconvénient très-grave.

Nous ne pouvons que vous remercier, Monsieur, d'avoir mis à notre disposition un métal qui modifie singulièrement les difficultés qu'on rencontre dans la fabrication d'une règle géodésique, et nous vous prions de recevoir l'assurance de nos sentiments les plus distingués.

BRUNNER frères.

M. Mascart, professeur au Collége de France, successeur de Victor Regnault, possédant ses instruments et ses méthodes, a bien voulu s'associer à moi pour faire le travail dont je vais donner à l'Association les premiers résultats. C'est donc en son nom et au mien que je vais parler désormais.

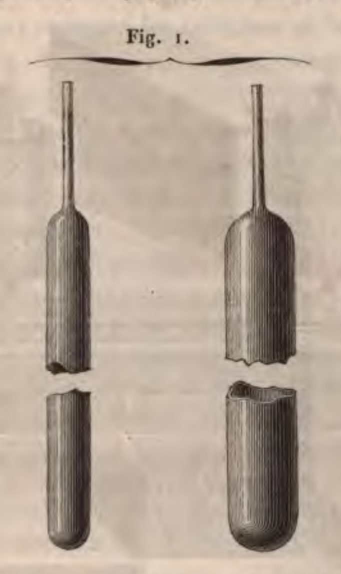
Coefficient de dilatation.

D'après ce qu'on a vu au commencement de cet exposé, M. Matthey a partagé le lingot de platine préparé pour la règle géodésique en deux parties inégales. Les deux tiers de ce lingot ont été employés à la fabrication de la règle.

Quant à l'autre tiers, il a été travaillé par le laminage et la soudure autogène, sous la forme de deux cylindres creux de 1 millimètre d'épaisseur, d'une longueur de $1^{m},06$ environ et de diamètres différents.

Chacun de ces cylindres est fermé à ses extrémités par deux calottes sphériques (*fig.* 1), et l'une de ces calottes est

Fig. 1.



terminée par un tube capillaire en platine iridié de 50 millimètres de longueur.

Le diamètre extérieur est de 36 millimètres pour l'un de ces tubes et de $19^{mm},04$ pour l'autre. Toutes ces dimensions, pouvant subir de légères modifications à la suite des épreuves auxquelles les tubes devaient être soumis, n'ont pas été déterminées avec une grande précision.

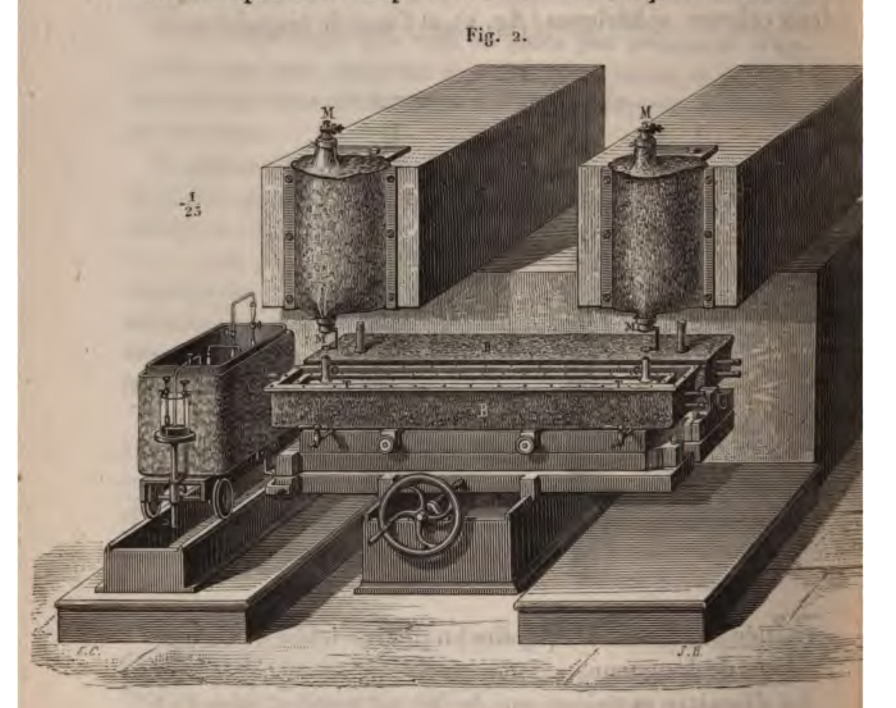
MM. Brunner ont tracé sur ces deux cylindres deux traits équidistants, séparés par une longueur très-voisine du mètre des Archives.

L'un d'eux est destiné à servir de témoin temporaire pour la comparaison. Il est maintenu, sur des supports à rou-

lettes, dans une auge à double paroi montée sur le chariot d'un comparateur (*fig.* 2).

Une seconde auge semblable, placée sur le même chariot, reçoit le plus gros (T) des deux tubes, celui sur lequel doivent porter les expériences. Le chariot permet de faire

Fig. 2.



passer successivement sous deux microscopes fixes les traits tracés à égale distance sur les deux tubes cylindriques.

Les microscopes, montés sur des piliers solides, permettent de déterminer dans chaque expérience les longueurs comprises entre les deux traits de chaque tube, d'où l'on peut déduire le coefficient de dilatation de la matière.

Ce comparateur a été construit avec le plus grand soin par MM. Brunner frères.

Le problème que nous nous sommes posé n'est pas simple. C'est pour cela, et à cause de la difficulté du sujet, du long temps qui s'écoulera encore avant que le travail soit terminé, que nous allons décrire non-seulement nos appareils construits, les résultats déjà obtenus, mais aussi nos appareils en construction et nos projets mêmes, afin que nous puissions recevoir les critiques et les conseils de tous les membres de l'Association et même de tous les savants qui, en dehors d'elle, s'occupent de Métrologie.

Notre intention est d'abord de déterminer le coefficient de dilatation du platine iridié de la règle géodésique avec une grande précision et ensuite de transformer en témoin permanent l'un des tubes (le tube T) construits avec la matière de cette règle. Un pareil tube témoin pourra servir en tout temps pour constater si cette matière n'a pas subi, par suite d'une action moléculaire, une modification qui impliquerait un changement de longueur de la règle géodésique, et pour déterminer alors la variation de cette longueur.

Nous nous occuperons d'abord du coefficient de dilatation de la règle géodésique, et nous examinerons successivement les différentes parties de l'opération.

1° *Détermination des longueurs.* — Notre comparateur est composé de trois pierres calcaires supportées par un massif de béton de plus de 2 mètres d'épaisseur.

La pierre [1] qui sert de base a une longueur de $1^{m},65$, une largeur de $0^{m},60$ et une épaisseur de $0^{m},75$.

---

[1] MM. Brunner ont eu l'idée de remplacer les pierres par des blocs de fonte. Nous croyons l'idée excellente, surtout si l'on coule ces blocs creux et qu'on les remplisse constamment de glace en les entourant de feutre. Les grosses pierres ne peuvent qu'au bout d'un temps considérable se mettre jusqu'au centre à la température ambiante et ne doivent jamais être en repos. D'ailleurs, en employant les phénomènes de chaleur latente pour porter à une température invariable et les instruments et les matières à mesurer, on peut entretenir dans les salles d'observation une fraîcheur agréable pendant l'été, et pendant l'hiver une température douce, sans

Deux autres pierres, celles qui supportent les microscopes, ont pour longueur $1^m,10$, pour largeur $0^m,50$ et une épaisseur de $0^m,45$.

Les microscopes portent d'excellents micromètres que MM. Brunner ont bien voulu nous prêter. Les divisions du tambour donnent directement le micron et permettent d'en estimer le dixième.

Au-dessous des microscopes se meut un chariot qui porte les deux auges où reposent sur des galets roulants les tubes de platine iridié.

Chacune de ces auges est composée d'une double boîte à faces rectangles dont les parois supérieures sont formées par des couvercles vissés un peu écartés l'un de l'autre, l'augette intérieure étant d'ailleurs fixée solidement à l'auge extérieure.

Celle qui contient le petit tube (t) de platine doit seulement recevoir de la glace : le tube est entouré d'un manchon de cuivre rouge percé de trous, destiné à supporter le poids de la glace, et le tout est enfermé dans l'augette centrale, fermée de son couvercle, de sorte que le tube est refroidi par deux enveloppes concentriques remplies de glace.

Le gros tube (T), de 1 litre environ de capacité, est enfermé de la même manière dans une auge plus grande, portée sur le même chariot.

Les auges sont percées de deux trous par lesquels passent deux tubes, soit en caoutchouc, soit en fer, avec fermeture hydraulique au mercure, qui isolent complétement les traits et permettent d'introduire dans l'auge soit de la glace, soit la vapeur d'un liquide en ébullition, sans que la glace, l'eau ou cette vapeur puisse toucher le trait. C'est

---

s'astreindre, comme on l'a proposé et appliqué sans succès, à maintenir une grande salle à une température constante, hiver et été, au grand détriment de la santé des observateurs.

par cette ouverture, dont on éclaire le fond avec la lumière réfléchie sur un miroir, qu'on peut viser les traits des tubes. La largeur des traits est de 5 à 7 microns, et les microscopes grossissent 40 à 50 fois.

Le gros tube, soigneusement jaugé et rempli d'azote pur, doit être porté successivement à des températures croissantes, depuis le point de fusion de la glace jusqu'au point d'ébullition de l'eau, en faisant pénétrer la glace ou les vapeurs de liquides convenablement choisis dans les cavités comprises entre les différentes parois de l'auge.

Ce tube communique avec un manomètre et sert de thermomètre à air; sa température est donnée par une pression ou par un poids de mercure. En comparant la distance de ses deux traits avec celle des traits du petit tube témoin *t* constamment maintenu dans la glace fondante, on a tous les éléments nécessaires pour calculer le coefficient de dilatation de la matière.

Ces déterminations pourront toujours être contrôlées d'une manière absolue et à un moment quelconque, si l'on a le moyen de retrouver le millimètre qui a servi aux mesures; nous verrons plus loin comment la longueur de ce millimètre sera comparée à la longueur de l'onde d'une lumière homogène.

Jaugeage du tube thermométrique en platine iridié.

Nous nous sommes servis, pour cette opération, d'une balance de M. Deleuil père, balance dont s'est servi V. Regnault pour exécuter ses travaux sur la Thermométrie. Nous l'avons fait ajuster de telle manière que la sensibilité fût maximum quand chaque plateau était chargé de 5 kilogrammes. Pour toutes les opérations auxquelles nous avons employé la balance, cette charge a été maintenue constante. Dans ces conditions, la sensibilité était telle, que l'addition de 1 milligramme était accusée par une

déviation de l'aiguille égale en moyenne à 12,5 des unités que nous avons adoptées, de sorte qu'on pouvait apprécier très-facilement le dixième de milligramme.

La sensibilité dans une balance est une qualité facile à obtenir. Ce qui fait le défaut de presque toutes les balances, au moins de celles que nous avons eu l'occasion de manier (instruments construits cependant par les plus habiles artistes de l'Europe), c'est le manque de concordance dans les pesées d'une même matière. Nous entendons par là la différence qui existe entre deux pesées d'un corps, après qu'on les a corrigées de la poussée de l'air, même lorsque les expériences ont été faites à des époques rapprochées.

Ces différences proviennent de diverses causes. Il en est une qui ne peut être évitée : c'est celle qui est due à la distribution inégale des températures sur les deux bras du fléau. On n'écartera cette cause d'erreur que si l'on effectue les pesées dans une enceinte à température rigoureusement constante, et par conséquent entourée de glace. Cette disposition exige aussi que l'enceinte soit vide d'air. Une balance pesant dans le vide et à zéro est un instrument indispensable pour les opérations précises de Métrologie, et nous en parlerons plus loin. Nous en avons commandé une; mais, en attendant qu'elle soit exécutée, il nous a fallu utiliser celle dont il vient d'être question, et qui nous a donné des résultats d'une exactitude plus que suffisante pour déterminer le coefficient de dilatation de la règle géodésique.

Pour qu'une balance plongée dans l'air, dont la température varie peu et lentement, soit insensible aux variations de la température et de la pression atmosphérique, il faut nécessairement que ses plateaux aient le même poids et le même volume, ce qu'il est facile de réaliser. Mais ce qui est plus difficile à obtenir, ce sont des fléaux dont la forme soit exactement symétrique par rapport au centre

de gravité. Ce défaut se manifeste surtout dans les fléaux évidés, ceux, par exemple, qui portent des trous circulaires. Il suffit que les centres de ces trous ne soient pas, de part et d'autre, à une même distance du couteau central, pour que la balance devienne sensible, à la même température, aux changements de pression accusés par le baromètre.

La seule manière de corriger cette cause d'erreur consiste dans la multiplicité des pesées. Il faut, de plus, que les poids marqués ou les tares, présentant rigoureusement le même volume extérieur, soient autant que possible de même nature [1].

En répétant les pesées soir et matin, observant et inscrivant avec les poids marqués la hauteur du baromètre, la température et le point de rosée, on obtient une série de nombres que l'on traduit par une courbe ou par une formule empirique.

On prend pour une des variables le poids de la matière, pour l'autre variable la pression atmosphérique, diminuée des $\frac{3}{8}$ de la force élastique de la vapeur d'eau hygrométrique et du produit de la variation de température par $2^{mm},78$ [2]. Ce dernier produit doit être ajouté à la pression

---

[1] Deux autres causes très-fréquentes de l'inconstance dans une balance viennent : 1° de ce que les poids, placés sur des parties différentes d'un même plateau, ne produisent pas le même effet sur le fléau. On corrige ce défaut en plaçant sur les plateaux et à la partie inférieure de ceux-ci deux pointes. On change la place des poids sur le plateau jusqu'à ce que ces deux pointes soient toujours l'une au-dessus de l'autre.

Souvent aussi la balance, mise au repos, puis en mouvement, ne donne pas deux fois de suite la même déviation de l'aiguille. Nous ne connaissons pas de remède à ce défaut fréquent.

[2] En réalité, le coefficient par lequel il faut multiplier la variation de température pour ramener l'expérience aux conditions moyennes est lui-même fonction de la température et de la pression. La valeur 2,78 conviendrait pour la pression de 760^{mm} et des températures voisines de zéro. Les variations de température ont toujours été très-faibles et les erreurs que l'on a pu commettre par cette correction approchée n'atteignent pas $\frac{1}{10}$ de milligramme.

ou en être retranché, suivant que la température est inférieure ou supérieure à la température de comparaison. La pression ainsi calculée est proportionnelle à la densité de l'air. On obtient ainsi la loi des variations de la balance avec l'état atmosphérique et la modification qu'on doit faire subir aux poids pour les ramener à une même densité de l'air dans deux séries de pesées de deux matières différentes.

Ainsi, quand nous avons pesé le tube de platine iridié vide d'air, ce qui a duré plusieurs mois, nous avons étudié la loi de la variation du poids P de ce tube avec la densité de l'air exprimée par la formule $b_0 - \frac{3}{8}f - (t - t_0)\,2,78$, t_0 étant la température de comparaison et $2^{mm},78$ la hauteur de mercure qui produit le même changement de densité de l'air qu'une variation de température de 1 degré. Nous avons établi ainsi la fraction de milligramme dont augmente ou diminue le poids placé sur la balance, quand cette somme $\varpi = b_0 - \frac{3}{8}f - (t - t_0)\,2,78$ diminue ou augmente d'une unité.

On divise ensuite la somme de tous les poids par le nombre des pesées, on fait de même la moyenne de toutes les pressions réduites et l'on obtient ainsi pour la première pesée celle qui donne le poids du tube, un certain nombre p de kilogrammes et de fractions de kilogramme correspondant à une pression ϖ parfaitement déterminée.

On remplit d'eau ce même tube, on enlève de la balance un certain nombre de poids dont la densité est connue, dont l'étalonnage est irréprochable, et, en effectuant des pesées analogues pendant le même temps, les accompagnant des mêmes observations météorologiques, on obtient, par la même méthode, un poids p' à une pression ϖ'. On peut alors ramener par le calcul les poids du tube plein et du tube vide à ce qu'ils seraient s'ils avaient été effectués à la même pression ϖ, c'est-à-dire si les conditions de pression, d'humidité et de température avaient

été invariables pendant toute la durée de l'opération.

Ainsi nous avons taré notre tube vide d'air, et il avait gardé le vide d'une manière absolue pendant trois ou quatre mois; il l'aurait gardé indéfiniment. Nous avons observé, puis calculé la variation moyenne de la tare, composée de poids en laiton de densité connue, parfaitement étalonnés entre eux et comparés avec le kilogramme de l'Observatoire, dont il sera question plus loin.

Nous avons ensuite rempli le tube d'eau maintenue à zéro et vide d'air pendant huit jours, enlevant à l'état de vapeur, qu'on absorbe par la potasse, l'eau qui dépassait l'extrémité du tube capillaire, et nous l'avons replacé sur la balance. La nouvelle pesée, prolongée pendant le même temps et corrigée de la même manière, nous a donné le chiffre suivant :

Eau à zéro contenue dans le tube.. $1^{\mathrm{kg}},03881227$

Une seconde opération, faite dans les mêmes conditions, a donné

$$1^{\mathrm{kg}},03881269,$$

ce qui fait une différence de $0^{\mathrm{mgr}},42$ entre les deux pesées.

Le kilogramme adopté comme unité dans ces opérations est le kilogramme de l'Observatoire, « kilogramme conforme à la loi du 18 germinal an III et présenté le 4 messidor an VII », signé de « Fortin ». Son volume est $48^{\mathrm{cc}},5333$ à zéro.

Le kilogramme employé dans les pesées a été le kilogramme de Regnault, en laiton, dont le volume est $124^{\mathrm{cc}},65$ à zéro. Son équation dans le vide est

$$\text{kilog. Obs.} = \text{kilog. Regnault} - 7^{\mathrm{mgr}},32.$$

Les poids divisionnaires sont de MM. Collot frères [1];

---

[1] Ils sont désignés dans nos cahiers de procès-verbaux sous le nom de *poids de la boîte* A.

ils sont en laiton platiné. Leur volume total à zéro est 125 centimètres cubes, correspondant à une densité égale à 8, ou plus exactement 7,998. La boîte se compose d'un poids de 500 grammes et de ses subdivisions jusqu'au gramme. Chacun des poids de cette boîte a été comparé au poids de 500 grammes pris pour unité, lequel a pour équation, par rapport au kilogramme de l'Observatoire,

$$\text{kilog. Obs.} = 2 \times 500^{\text{gr}} + 12^{\text{mgr}},41 \ (^1).$$

Il faut remarquer que, dans le cas où les poids marqués et les matières à peser présentent exactement le même volume, toutes les variations des pesées tiennent uniquement aux imperfections de la balance; quand les volumes sont inégaux, comme par exemple lorsque nous avons enlevé l'eau contenue dans le tube et que nous y avons fait le vide, les variations sont dues d'abord au changement de densité de l'air, puis aux imperfections de la balance. On a déterminé celles-ci fort exactement; quant à la variation apparente des poids, on l'élimine en ramenant les pesées à ce qu'elles seraient dans le vide, c'est-à-dire en ajoutant à la valeur de chaque poids le poids du volume d'air qu'il déplace dans chaque expérience.

On peut souvent annuler toute influence des poids excédants sur la pesée, en mettant du côté de la tare des poids en laiton et de petits barreaux d'aluminium, de manière que le volume total soit exactement le même pour les deux plateaux. Cette correction est surtout facile quand on a surchargé la balance par des poids additionnels pour atteindre une somme de 5 kilogrammes.

---

(1) Nous avons fait toutes les comparaisons nous-mêmes; mais elles ont été recommencées par M. Broch avec une excellente balance de M. Sacré. Les petites différences qui existent entre nos résultats et ceux de M. Broch nous donnent une grande confiance dans cet étalonnage; mais nous avons admis, sans les modifier, les chiffres donnés par M. Broch, comme devant inspirer plus de confiance que les nôtres.

Voici maintenant comment nous avons opéré pour vider et remplir le tube (T) de platine iridié.

Nous avons, au moyen d'un petit tube conique de caout-

Fig. 3.



chouc, adapté à la partie supérieure du tube capillaire une boule de verre (*fig.* 3) à deux robinets qui nous permet d'y faire le vide, d'abord avec une machine de Geissler, ensuite avec une trompe de Sprengel. Pour nous assurer de

thermomètre qui possède une échelle continue depuis zéro jusqu'à 100 degrés est en général trop court pour que de petites variations y soient nettement appréciables. Le coefficient de dilatation du verre doit changer aussi avec les variations de forme, ce qui entraîne nécessairement une modification dans les rapports des volumes apparents de mercure qui définissent les degrés thermométriques.

Le verre, en effet, se conduit comme la cire à cacheter, comme une matière pâteuse : il ploie avec le temps sous son propre poids et se déforme manifestement sous l'influence de la pression atmosphérique, surtout quand il constitue les parois d'un vase vide d'air. Cette tendance à la déformation produit alors une élévation du zéro, laquelle devient plus facile encore par une élévation de température qui augmente la viscosité du verre.

Ainsi trois thermomètres vides, construits par M. Baudin avec un soin et une perfection inconnus avant lui, ont été soumis pendant trois ans, nuit et jour, à des températures constantes : le premier était porté à 266, le second à 206, le troisième à 166 degrés. Au bout de ce temps, le zéro du premier thermomètre avait monté de 13°,5, le zéro du second avait monté de 12°,5, et le zéro du troisième s'était élevé à 11°,4.

Chacun de nous est arrivé de son côté à cette conclusion qu'un thermomètre est un instrument qui a une individualité propre et que, dans une expérience de contrôle, il ne peut être remplacé par aucun autre semblable. On doit donc reconnaître que les expériences thermométriques faites avec le thermomètre à mercure, à de longs intervalles, ne sont pas rigoureusement comparables entre elles.

Le thermomètre à alcool est préférable, parce que la dilatation de l'alcool est de beaucoup supérieure à celle du mercure et que, par suite, l'influence des variations de structure et de dilatation du verre y est moins perturbatrice.

La même remarque s'applique, à plus forte raison, au cas où la matière thermométrique est un gaz, comme l'air, ou mieux l'azote, qui n'attaque pas le mercure.

En effet, les coefficients de dilatation cubique du verre, du mercure, de l'alcool et de l'air sont entre eux comme les nombres

26	pour le verre...............	1
180	pour le mercure.............	7
1049	pour l'alcool.....	40
3667	pour l'air.......	142

Or, on ne sait jamais quelle est au juste la loi de dilatation du verre que l'on emploie, ni son degré d'uniformité, tandis que pour le mercure et l'alcool on connaît très-bien même le coefficient du troisième terme de la formule parabolique par laquelle on représente la dilatation. Rien ne serait plus facile que de graduer les thermomètres à alcool en les plongeant dans de la vapeur d'eau à pression déterminée, ou dans des vapeurs d'alcool pur, d'éther, d'éther chlorhydrique, tous corps faciles à obtenir et à conserver dans un état de pureté absolue, et dont on déterminerait les points d'ébullition au moyen du thermomètre à air. Un thermomètre à alcool coloré par des traces d'orseille est un instrument fort commode à employer, et il serait ainsi plus exact que le thermomètre à mercure, mais moins que le thermomètre à air, parce que la dilatation de l'air est bien plus grande que celle de l'alcool. Seulement il faudrait avoir soin que sa tige tout entière plongeât dans le milieu dont on veut prendre la température.

On évite bien des erreurs de lecture en se servant du thermomètre à alcool. V. Regnault en recommandait l'usage. Gradué comme nous venons de le dire et employé avec précaution, un pareil thermomètre n'aurait aucun inconvénient et il présenterait l'avantage que le déplacement du zéro y est insensible.

Toutefois, l'un quelconque de tous ces instruments appliqué sur une règle métallique n'en donnerait pas encore la température.

La règle placée dans l'air y possède autant de températures différentes qu'il existe de filets d'air en mouvement, par suite des variations continues de la température du gaz, ces variations ne cessant que si l'enceinte est entourée de glace ou d'une vapeur saturante.

La règle placée dans l'eau y subit des influences de même nature, moins sensibles à la vérité, mais dont les effets ne peuvent être mesurés; or, dans les expériences de Micrométrie, tout ce qui n'est pas susceptible d'une mesure exacte ne peut recevoir d'application.

La seule ressource qui nous reste pour connaître la température d'un corps solide est d'en faire le réservoir d'un thermomètre. Encore faut-il que la matière thermométrique qu'on y renfermera ait une faible chaleur spécifique et que son poids soit négligeable par rapport au poids de l'enveloppe. Ces dernières conditions sont nécessaires pour que le thermomètre puisse être sensible, c'est-à-dire donner à tout instant la température moyenne de l'enveloppe, dans les cas où cette température est variable; alors même les variations ne doivent pas être trop brusques. Sous ce rapport, le corps solide transformé en thermomètre à air et plongé sous une faible épaisseur dans un liquide de grande densité et d'une forte chaleur spécifique, comme le mercure ou l'eau, sera dans d'excellentes conditions. Si l'on veut mesurer des variations lentes de la température, il vaut mieux encore entourer le tube thermométrique d'une enveloppe peu conductrice, d'après la méthode indiquée par M. le baron Wrede.

Ce sont là les motifs qui nous ont déterminés à faire un tube avec le platine iridié de la règle géodésique et à le remplir d'azote comme matière thermométrique.

L'azote a été préparé avec de l'air que l'on a fait passer

au travers de longs tubes de verre remplis de cuivre et chauffés au rouge; on a purifié ensuite le gaz au moyen de potasse monohydratée et sèche.

On déterminera la température du tube par l'augmentation ou la diminution du volume de cette masse confinée d'azote, en même temps que seront faites les mesures de l'espace compris entre les deux lignes tracées sur sa surface.

Voluménomètre à pression et à température constantes.

Pour mesurer l'azote sorti de notre tube de platine iridié, nous avons fait construire, par M. Alvergniat, un voluménomètre entièrement en verre, fondé sur ce principe que la masse de gaz qu'il contient peut toujours être ramenée à la pression d'une autre masse d'azote enfermée dans un espace absolument imperméable et parfaitement clos; cet azote, le vase qui le contient et le mercure qui est en contact avec lui, tout l'appareil enfin est toujours entouré de glace et par conséquent maintenu à une température constante.

Le voluménomètre se compose d'un tube en U (*fig.* 5), dont la portion M est remplie de gaz azote sec. Ce tube est surmonté d'un système de robinets qui servent à introduire le mercure et l'azote, et que l'on supprime après le remplissage; le tube M est alors fermé à la lampe dans sa partie effilée, au-dessous du robinet R'.

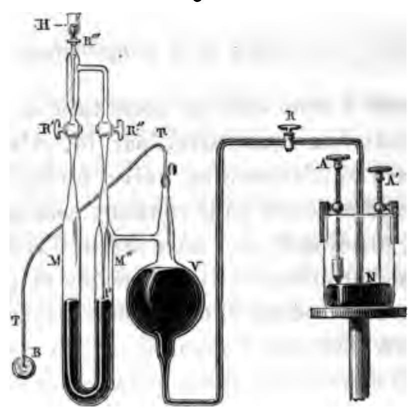
La partie inférieure de ce tube est remplie de mercure dont le niveau P est assujetti à toucher une pointe d'émail blanc faisant fonction de la pointe d'ivoire du baromètre Fortin. Ce tube doit être aussi fermé à la lampe au-dessus du robinet R'', qui sert, comme le robinet R', au remplissage de l'appareil.

Le tube M' communique lui-même par un tube horizontal avec un réservoir V dont la partie supérieure O est

soudée à un tube fin de 1 millimètre de diamètre en platine; l'autre bout de ce tube pénètre à l'intérieur du tube capillaire situé à l'extrémité du cylindre de platine iridié qui sert de thermomètre à air et qui est placé dans l'une des auges du comparateur. Ce tube est désigné par la lettre T dans la figure. Il est soudé à l'or à la partie capillaire du cylindre de platine iridié.



Fig. 5.



La sphère V communique donc avec l'intérieur du tube M′ par le tube horizontal et avec le cylindre de platine iridié en B par le tube capillaire en platine T.

Enfin cette sphère V communique aussi par sa partie inférieure, et au moyen d'un tube de verre doublement recourbé, avec le mercure renfermé dans un vase de verre N. Elle est remplie de mercure, lorsque le cylindre-thermomètre, l'azote qu'il contient et tout le voluménomètre sont plongés dans la glace; son volume a été calculé de façon qu'elle puisse recevoir tout le gaz qui sortira du thermomètre par suite d'une dilatation à pression constante jusqu'à la température de 100 degrés.

Un robinet R permet d'ouvrir ou de fermer la communication entre la sphère V et le mercure du vase N. Celui-

ci est placé sur un plateau qui peut monter ou descendre au moyen d'une crémaillère; on peut ainsi, en changeant le niveau du mercure en N, faire entrer du mercure dans la sphère ou faire sortir du liquide, de manière à augmenter ou diminuer la pression de l'azote compris dans l'espace VO et le cylindre thermométrique, jusqu'à ce que la pointe P, observée au moyen d'une bonne lunette, soit parfaitement tangente à la surface du mercure. Alors on est sûr que tout l'azote est ramené à la pression du gaz confiné en M.

A partir du robinet R, le voluménomètre tout entier, y compris le tube capillaire en platine T, est plongé dans la glace.

On comprend sans difficulté le maniement de cet appareil, dont la description sera plus détaillée dans la seconde partie de ce Mémoire. Ainsi le cylindre de platine étant placé dans la glace, aussi bien que le voluménomètre, on fait monter ou descendre le niveau du mercure au moyen de la crémaillère, et l'on achève l'opération à l'aide de petits plongeurs portés par des vis A et A', jusqu'à ce que la pointe P affleure la surface.

Alors on ferme le robinet R et l'on pèse le vase avec le mercure qu'il contient. Ce poids déterminé, on remet le vase sur le plateau, au-dessus de la crémaillère, dans la position qu'il occupait et comme il est représenté sur la figure.

Le voluménomètre est placé (*fig.* 2) dans une caisse en cuivre garnie à l'extérieur avec du feutre, comme toutes les parties de l'appareil dont on veut maintenir la température constante.

Cette caisse est posée sur un plateau à roulettes et entraînée par le chariot du comparateur. Elle est percée, à la partie inférieure, d'un trou qui laisse passer au travers d'un tube de caoutchouc, mince et étranglé dans sa partie moyenne, le tube capillaire en platine qui fait communi-

quer le thermomètre avec le voluménomètre. Une disposition très-simple, plus facile à imaginer qu'à décrire, permet à tous les organes de se rapprocher ou de s'éloigner de quelques millimètres, afin que les dilatations ou les contractions puissent s'effectuer sans aucun effort.

L'appareil étant à zéro et la pointe P tangente à la surface du mercure, on compare avec les microscopes les distances qui séparent les traits tracés sur les deux tubes, l'un, le cylindre-thermomètre ou gros tube en platine iridié, l'autre, petit cylindre témoin de même matière, tous les deux placés dans leur auge et plongés dans la glace.

On rouvre alors le robinet R, on laisse fondre la glace du tube thermométrique T, on la remplace par du feutre ou de l'édredon. Le gaz azote se dilate sous l'influence de la température ambiante. On mesure la température lorsqu'elle passe par un maximum ou un minimum, en élevant ou abaissant le niveau du mercure dans le vase N, au moyen de la crémaillère ou des plongeurs A et A', jusqu'à ce que la pointe P affleure la surface du liquide.

On ferme le robinet R, on détermine le poids du mercure entré dans le vase N, ce qui suffit pour calculer la température : on sait, en effet, quel est l'excès de poids du mercure qui correspond à une élévation de température de 1 degré. Dans notre appareil, ce poids est de 40 grammes environ.

Enfin on remet les deux traits du cylindre thermométrique T sous les microscopes, on compare leur distance à la distance comprise entre les deux traits du petit cylindre *t*, lequel a été maintenu à zéro, et l'on a tous les éléments nécessaires pour calculer la dilatation du platine iridié entre zéro et la température qui a été déterminée par l'instrument lui-même.

En répétant cette observation chaque jour, matin et soir, hiver et été, on peut obtenir la dilatation du platine iridié

pour chaque degré en un point quelconque de l'échelle thermométrique.

La seule expérience que nous ayons pu réaliser encore avec cet appareil est celle qui devait précéder toutes les autres et qui nous a permis de démontrer la fixité absolue du point de fusion de la glace.

Pour cela, nous avons maintenu de la glace pendant plus de cinquante heures autour du tube thermométrique T, et naturellement autour du voluménomètre. La température est devenue fixe au bout de douze heures, ce que nous avons reconnu en fermant le robinet R du voluménomètre et constatant avec une bonne lunette que la pointe P restait toujours tangente à la surface du mercure, sans aucune variation appréciable, pendant plus de trente-six heures.

Cette fixité du point de fusion de la glace, dont quelques savants ont douté, s'obtient dans les conditions suivantes :

1° Il faut employer de la glace conservée pendant longtemps dans une glacière;

2° Il faut la concasser en fragments de la grosseur d'une noisette et la cribler, de manière à écarter tous les gros morceaux;

3° Il faut que le tube thermométrique soit enfermé dans deux enveloppes, comme celles de l'auge placée sur le comparateur, et que les deux enveloppes soient constamment au contact de la glace.

Il faut bien se garder d'employer de la glace artificielle récemment préparée dans des bassins soumis à l'action d'une basse température, comme on le pratique aujourd'hui dans l'industrie. La température de cette glace n'est naturellement pas la même au centre et à la surface des morceaux, quelque petits que soient les fragments en lesquels on la divise.

L'auge du comparateur qui contient le tube thermo-

métrique est percée de deux trous munis de tubulures qui pénètrent chacune dans les deux auges concentriques. Par l'une de ces ouvertures on peut faire pénétrer de la vapeur d'eau ou de tout autre liquide convenablement choisi dans la Table ci-dessous, et en particulier des matières marquées d'un astérisque, avec lesquelles nous nous proposons de graduer les thermomètres à alcool. Elles présentent l'avantage qu'on les trouve dans le commerce ou qu'on les purifie facilement.

Températures d'ébullition sous la pression atmosphérique d'après V. Regnault.

* Protoxyde d'azote..........	— 87,90
* Acide carbonique..........	— 78,20
Acide sulfhydrique..........	— 61,80
* Ammoniaque.............	— 38,5
Chlore....................	— 33,6
* Éther méthylchlorhydrique..	— 23,73 + 0,030 (H — 760)
Éher méthylique............	— 23,65 + 0,030 (H — 760)
Acide sulfureux......	— 10,08 + 0,030 (H — 760)
* Éther chlorhydrique........	+ 12,50 + 0,035 (H — 760)
Chlorure de cyanogène.......	+ 12,66 + 0,034 (H — 760)
Chlorure de bore...........	+ 18,23 + 0,038 (H — 760)
Éther.....................	+ 34,97 + 0,039 (H — 760)
Éther bromhydrique.........	+ 38,37 + 0,039 (H — 760)
* Sulfure de carbone.........	+ 46,20 + 0,039 (H — 760)
Acétone..................	+ 56,30 + 0,037 (H — 760)
Chlorure de silicium.........	+ 56,81 + 0,041 (H — 760)
* Chloroforme..............	+ 60,16 + 0,037 (H — 760)
Esprit-de-bois.............	+ 66,78 + 0,033 (H — 760)
Chlorure phosphoreux.......	+ 73,80 + 0,044 (H — 760)
Chlorure de carbone C^2Cl^4....	+ 76,50
* Alcool..................	+ 78,26 + 0,033 (H — 760)
Benzine..................	+ 80,36 + 0,040 (H — 760)

Températures d'ébullition sous la pression atmosphérique, d'après V. Regnault (suite).

*Eau	$+100,00+0,037(H-760)$
Hydrocarbure de brome	$+131,60+0,047(H-760)$
Essence de térébenthine	$+159,15$
Éther méthyloxalique	$+164,20$
Essence de citron	$+174,80$
Mercure	$+357,25+0,074(H-760)$
Soufre	$+448,00+0,080(H-760)$

La vapeur d'eau, bien entendu, devra être employée pour vérifier les opérations et contrôler la valeur du coefficient de dilatation de l'azote.

Cette Table, dont les nombres sont empruntés au grand travail de V. Regnault, comprend des substances qui attaquent le caoutchouc. Dans ce cas, il sera nécessaire de remplacer les tuyaux de caoutchouc, qui permettent de voir les traits tracés sur le tube thermométrique T, par un tube de métal, avec une couche de liquide faisant fermeture hydraulique, pour clore l'espace où se meut la vapeur.

Calcul de la température et densité du mercure.

Quand on a pesé le mercure sorti de l'appareil par suite de la dilatation de l'azote maintenu à une pression invariable, il suffit de diviser ce poids par la densité du mercure à zéro, pour avoir la fraction dont a augmenté le volume de l'azote, en tenant compte de l'accroissement du volume du tube thermométrique qui correspond à l'augmentation de la distance comprise entre les traits.

L'ensemble de ces mesures permet de calculer la température et la dilatation du métal ; mais, en toute rigueur, il faut que la densité à zéro du mercure dont on se sert soit prise par rapport à celle de l'eau à zéro, puisque l'eau était précisément à cette température quand on s'en est servi pour jauger le tube thermométrique.

Le maintien prolongé des soudures de nos auges dans la glace ayant déterminé leur rupture, il a fallu démonter l'appareil, pour le faire réparer, et recommencer toutes les opérations préliminaires, qui sont beaucoup plus longues que les mesures définitives elles-mêmes. C'est là ce qui explique pourquoi nous ne donnons pas encore d'expériences sur la dilatation de la règle géodésique internationale.

Densité du mercure.

Il nous restait un certain doute sur les qualités de la méthode employée d'habitude, et en particulier par V. Regnault, pour déterminer la densité du mercure.

Si l'on prend un ballon de verre, qu'on le remplisse de mercure à zéro, après avoir fait longtemps bouillir ce liquide pour chasser l'air adhérent au vase ; si, après la pesée du mercure, on remplit le même vase d'eau pure que l'on fasse bouillir et qu'on ramène à zéro, peut-on affirmer que le vase a repris à zéro, dans les deux cas, le même volume? En d'autres termes, n'est-on pas dans le cas d'un thermomètre à mercure qu'on chaufferait d'abord à la température de 360 degrés, puis qu'on refroidirait jusqu'à zéro, qu'on porterait ensuite à 100 degrés et qu'on ramènerait encore à zéro? Serait-on sûr que, dans toutes les circonstances, avec tous les verres, la pesée relative à ce point zéro ne changerait pas?

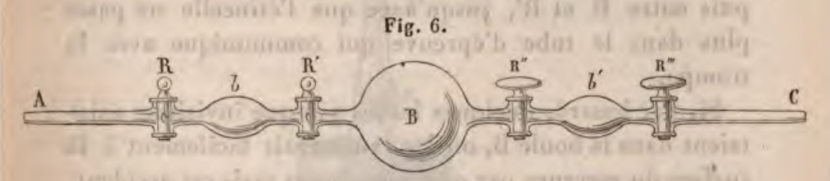
Il y a là un doute qu'on ne doit pas négliger. Pour être tout à fait rigoureux, il faudra faire varier la température du ballon de verre entre de faibles limites, par exemple de zéro à 15 ou 20 degrés, c'est-à-dire dans le voisinage de la température ambiante ; il faudra aussi tenir compte de la faible, mais incontestable solubilité du verre dans l'eau. Voici comment nous avons opéré :

Nous avons employé deux appareils de la forme représentée par la *fig.* 6.

B est une boule de cristal pouvant contenir de 4 à 5 kilogrammes de mercure dans l'intervalle limité par les robinets R′ et R″, y compris le canal du robinet R′.

On mesure exactement par une pesée hydrostatique le volume extérieur de l'appareil, après l'avoir entièrement rempli d'eau. On répète la même opération pour un appareil entièrement semblable, qui doit servir de tare. La différence qui existe entre eux est compensée par une boule de verre fermée de même nature, dans laquelle on a introduit du mercure en quantité telle qu'ils aient dans l'air exactement le même poids et le même volume.

Fig. 6.



On fait le vide dans ces deux appareils, et l'on emploie comme tare celui dont la capacité est la plus grande (quoique la différence doive être très-faible).

Quant à l'autre, celui qui doit servir à prendre la densité, on y fait le vide jusqu'à ce que l'étincelle ne passe plus dans le tube de contrôle rempli de sélénium qui communique avec la trompe de Sprengel, de manière à enlever jusqu'aux dernières traces d'air.

Alors, avec un tube de verre effilé, l'appareil étant tenu verticalement, on remplit de mercure l'espace compris entre l'extrémité A et le robinet R, puis on renverse cette extrémité dans une capsule contenant du mercure, et l'on ouvre sur ce mercure d'abord le robinet R. L'espace R*b*R′ doit se remplir intégralement. On ouvre le robinet R′; le mercure doit monter et, le robinet R″ étant fermé, on le laisse remplir toute la grande boule, à l'exception d'un espace à peu près égal au volume de la boule *b*. On ferme alors R′ et R.

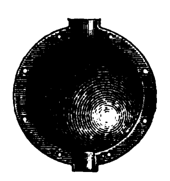
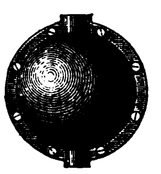
On renverse de nouveau l'appareil, l'extrémité A se trouvant en haut, et l'on ouvre R'; le mercure qui était contenu dans la boule *b* rentre dans la grande boule et la remplit entre les robinets R' et R''; en outre, une petite quantité de mercure doit rester dans la boule *b*, ainsi que dans le tube capillaire qui la joint à la boule B et porte le robinet R'. Cet excès de mercure doit être suffisant pour maintenir complétement pleine la boule B quand on entourera celle-ci de glace fondante.

On mastique alors sur la trompe de Sprengel l'extrémité A, on fait le vide de nouveau, d'abord entre R et A, puis entre R et R', jusqu'à ce que l'étincelle ne passe plus dans le tube d'épreuve qui communique avec la trompe.

Si, par hasard, quelques bulles presque invisibles existaient dans la boule B, on les ramènerait facilement à la surface du mercure par quelques chocs; mais cet accident, d'ailleurs sans importance, n'arrive jamais quand l'opération a été bien conduite.

Alors on introduit la boule B entre deux calottes hémisphériques en fer (*fig.* 7), dont les bords rabattus, ainsi

Fig. 7.

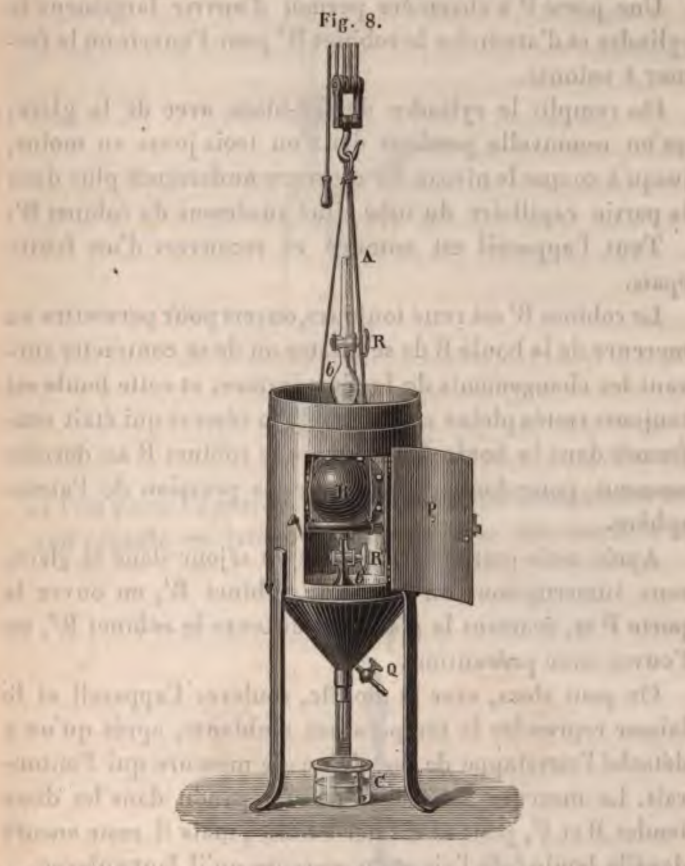



que deux petits cylindres ménagés en haut et en bas, sont garnis de caoutchouc et se ferment avec des vis. La fermeture doit être assez hermétique pour que, en versant du mercure dans l'intervalle compris entre l'enveloppe de fer et la boule B, le liquide ne s'écoule pas au travers des plis du caoutchouc, surtout dans le petit cylindre inférieur.

Cette disposition [1] est destinée à empêcher la déformation que pourraient éprouver les parois du vase de verre sous la pression du mercure qu'il renferme.

La boule B, ainsi enveloppée, est placée dans un cylindre

Fig. 8.



de fer-blanc, terminé en cône à sa partie inférieure et fermé par un bouchon percé d'un large trou (*fig.* 8).

Pour cela, la sphère formée par les deux calottes qui en-

---

(1) L'effet produit par cet appareil, auquel on n'a pas encore pensé, que nous sachions, est loin d'être négligeable.

tourent le ballon B est suspendue par trois cordes qui se réunissent en une seule à la partie supérieure et s'accrochent à un moufle à l'aide duquel on peut aisément placer l'appareil dans le cylindre et l'en retirer.

Une porte P à charnière permet d'ouvrir largement le cylindre et d'atteindre le robinet R″ pour l'ouvrir ou le fermer à volonté.

On remplit le cylindre de fer-blanc avec de la glace, qu'on renouvelle pendant deux ou trois jours au moins, jusqu'à ce que le niveau du mercure ne descende plus dans la partie capillaire du tube situé au-dessus du robinet R′.

Tout l'appareil est entouré et recouvert d'un feutre épais.

Le robinet R′ est resté toujours ouvert pour permettre au mercure de la boule B de se dilater ou de se contracter suivant les changements de la température, et cette boule est toujours restée pleine au moyen de la réserve qui était renfermée dans la boule *b*. On ouvre le robinet R au dernier moment, pour donner au mercure la pression de l'atmosphère.

Après trois jours et trois nuits de séjour dans la glace, sans interruption, on ferme le robinet R′, on ouvre la porte P et, écartant la glace qui entoure le robinet R″, on l'ouvre avec précaution.

On peut alors, avec le moufle, soulever l'appareil et le laisser reprendre la température ambiante, après qu'on a détaché l'enveloppe de fer pleine de mercure qui l'entourait. Le mercure intérieur, étant répandu dans les deux boules B et *b*′, peut se dilater à l'aise; mais il reste encore dans la boule *b* de l'air et du mercure qu'il faut enlever.

Pour cela, on mastique de nouveau l'extrémité A (*fig.* 8) sur la pompe de Sprengel, en introduisant entre l'appareil renversé et la pompe un petit réservoir Q (*fig.* 9), qui sera vidé exactement, ainsi que l'espace AR. Quand le vide est parfait, on ouvre le robinet R lentement,

et le mercure tombe dans le réservoir Q en même temps que la boule *b* se purge d'air. On ferme alors le robinet R,

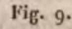
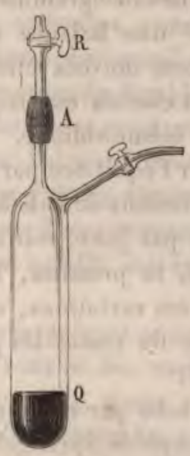


Fig. 9.



et l'on porte l'appareil sur la balance, en le soutenant avec une capsule en laiton (*fig.* 10) munie elle-même d'une

Fig. 10.



tige : celle-ci est terminée par un crochet qui s'attache au plateau de la balance.

La tare de l'appareil doit être faite, comme on l'a dit, par un autre appareil tout semblable et de même volume extérieur. On y met du mercure jusqu'à ce que les poids soient égaux à quelques décigrammes près, opération qui peut s'effectuer sur une balance commune. Les deux capsules et les supports doivent être construits avec les mêmes métaux, ayant chacun exactement le même poids, et par conséquent le même volume.

On achève d'établir l'équilibre par des poids en platine.

On observe les variations de la balance pendant deux ou trois mois, deux fois par jour, soir et matin, en déterminant la température, la pression, le point de rosée, et faisant la courbe de ces variations, de manière à pouvoir ramener la moyenne de toutes les pesées à une certaine pression ϖ commune.

Enfin on remet le tube par son extrémité A en communication avec la pompe de Sprengel et l'on retire tout le mercure; on constate, ce qui arrive toujours à cause de la perfection des robinets de verre, que le vide est resté parfait. On remet le tube sur la balance, on rétablit l'équilibre avec des poids rigoureusement étalonnés dont la densité est bien connue, et l'on recommence les pesées pendant deux ou trois mois, en faisant les déterminations indiquées plus haut.

Dans ce dernier cas, les variations de poids sont bien plus grandes, parce que non-seulement la balance, mais l'effet des poids marqués eux-mêmes varie suivant une loi connue avec les circonstances atmosphériques.

On ramène encore la moyenne des poids par le calcul à ce qu'elle serait si la pression $\varpi = b_0 - \frac{3}{8}f - (t - \theta)\, 2{,}78$ avait été la même dans toutes les pesées.

Toutes ces opérations sont ensuite répétées sur une balance ne portant qu'un kilogramme, en remplaçant le mercure par l'eau qui a servi à jauger le tube thermométrique T. On amène cette eau à zéro en prenant les mêmes

précautions. Seulement il est plus facile, dans le cas actuel, d'enlever toute l'eau excédante, parce qu'elle s'évapore dans le vide et qu'on l'absorbe par un tube de potasse intercalé entre la pompe de Sprengel et l'appareil.

Il faut, pour cette opération, conserver dans la boule *b* un excès d'eau beaucoup plus grand que celui qui suffirait à compenser la contraction du liquide lorsqu'on l'amène à zéro. Cette eau se volatilisera pendant l'exposition dans le vide qui sert à chasser l'air, et il doit en rester assez pour qu'on puisse constater qu'elle n'entre plus en ébullition, même sous l'influence d'une température de 25 degrés, ce qui est la preuve qu'elle est exactement dépouillée d'air.

On prend les mêmes précautions pour effectuer les pesées et déterminer la courbe des variations de la balance. Nous avons pu nous servir d'une excellente balance de M. Sacré, pesant 1 kilogramme, dont les variations avec la pression étaient extrêmement faibles, et qui appartient au Bureau international des Poids et Mesures.

En employant, pour le jaugeage du tube, des poids de même nature que pour la pesée du mercure, on peut, après les avoir ramenés à la même valeur de ϖ, faire le calcul de la densité sans tenir compte de la poussée de l'air. Les poids dont nous nous sommes servis ont été étalonnés par nous avec le plus grand soin et comparés avec le kilogramme de Fortin, appartenant à l'Observatoire de Paris. Mais ce qui leur donne une valeur inappréciable, c'est que toutes les comparaisons, avec les calculs qu'elles comportent, ont été répétées par M. le Dr Broch, de Christiania. Les résultats obtenus par le célèbre savant nous inspirent une confiance absolue.

On remarquera que, s'il est resté un peu de mercure adhérent au verre pendant l'opération qui consiste à vider les appareils, après qu'ils ont été pesés, cette circonstance ne doit nullement préoccuper : on peut, en effet, consi-

dérer ce mercure comme faisant partie de la tare et ne donnant lieu à aucune correction.

En résumé, un tube à densité B, plein de mercure à zéro, a été taré avec un autre tube de même volume et de même poids.

On a vidé ce tube B et l'on a remplacé par des poids marqués le mercure qu'il contenait. On a fait ensuite le vide à nouveau et recommencé les pesées avec la même tare.

Le tube à densité étant ensuite rempli d'eau à zéro et taré, on a enlevé les poids marqués qui faisaient l'équilibre et obtenu ainsi le poids de l'eau à zéro qu'il contenait. La solubilité du verre dans l'eau n'a donc pu apporter à ces opérations aucun trouble sensible.

Une expérience nous a donné :

Poids du mercure à zéro	3^{kg},86319680
Poids de l'eau à zéro	0^{kg},28410766

Nous avons obtenu ainsi la densité du mercure par rapport à l'eau qui nous a servi à jauger le tube de platine iridié T, cette eau étant d'ailleurs absolument pure.

Densité du mercure :

Eau à zéro, mercure à zéro........	13,59765
Eau à 4 degrés, mercure à zéro.....	13,59606

C'est le résultat que nous admettrons dans nos calculs postérieurs.

Une autre expérience, dont le résultat est suspect, parce que nous avons confondu les deux robinets, R' et R'', dont les canons n'avaient pas le même volume, a donné les nombres suivants :

Poids du mercure à zéro	3^{kg},97679448
Poids de l'eau à zéro	0^{kg},29216816

d'où l'on déduit, pour la densité du mercure à zéro, par rapport à l'eau à zéro,

13,6113;

pour la densité du mercure à zéro, par rapport à l'eau à 4 degrés,

13,6097.

Nous ne transcrivons ces chiffres que pour fournir une preuve de l'exactitude avec laquelle a été déterminé le jaugeage de nos appareils.

Une première opération, en effet, nous a donné pour le poids de l'eau à zéro contenue dans le ballon

$292^{gr},16815$;

une seconde opération,

$292^{gr},16817$,

en ramenant les poids à ce qu'ils seraient pour une même valeur de ϖ.

En prenant la densité du même mercure dans un petit appareil en verre de la forme d'un gros thermomètre muni d'un robinet en haut de sa tige, opérant sur $129^{gr},27625$ et faisant les pesées avec une balance de M. Sacré sensible au centième de milligramme, nous avons obtenu, pour la densité du mercure pris à zéro, par rapport à l'eau à 4 degrés,

13,5978.

Enfin, pour contrôler ce résultat, nous avons pris successivement, dans l'eau à 13°,3 et dans le mercure à 13°,1, la densité d'un cylindre de platine iridié; nous avons trouvé, pour la densité du mercure à zéro, par rapport à l'eau à zéro,

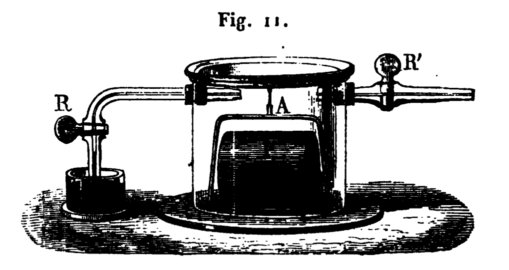
13,595,

et pour la densité du mercure à zéro, par rapport à l'eau à 4 degrés,

13,593.

Le lingot P était placé sur un support en platine dans un cylindre en verre A (*fig.* 11), fermé à sa partie supérieure par une glace rodée. A l'aide d'un robinet R′, adapté à l'une des parois de l'appareil, on faisait le vide absolu; par un autre robinet R, on laissait rentrer du mercure au moyen d'un tube capillaire, pendant que la pompe de Sprengel continuait à fonctionner pour enlever l'air que

Fig. 11.



le mercure aurait pu entraîner avec lui. On pesait le cylindre P avec son support dans l'air, puis dans l'eau, par les procédés qui servent à prendre la densité; ensuite on le pesait dans le mercure, après avoir fait, dans les deux cas, affleurer le liquide à une pointe d'acier fixée sur les parois du cylindre. On avait ainsi, après avoir observé la température, la pression et le point de rosée à chaque expérience, tous les éléments nécessaires pour calculer la densité du mercure.

En opérant sur $1^{kg},25653825$ de platine iridié, on a obtenu ainsi :

Perte de poids du platine dans le mercure P.	$792^{gr},92425$
Perte de poids du platine dans l'eau P′....	$58^{gr},36800$
Température du mercure T..............	$13^{o},1$
Température de l'eau t................	$13^{o},3$

En désignant par

p le coefficient de dilatation cubique du platine iridié de zéro à $16° = 0,00002541$,

m le coefficient de dilatation du mercure de zéro à $16° = 0,00017951$,

D_t la densité de l'eau à t degrés,

x la densité du mercure par rapport à l'eau à 4 degrés,

ε le poids spécifique de l'air,

on a

$$x' = \frac{P}{P'} D_t[1 + mT - p(T - t)],$$

$$x = x' - \varepsilon(x' - 1).$$

Il nous reste à donner quelques détails sur les balances que nous avons employées et sur celles que nous croyons nécessaires, si l'on veut déterminer exactement le poids de l'eau contenue dans le tube thermométrique destiné à servir de témoin pour révéler les modifications que pourra subir la matière de la règle géodésique.

Supposons deux lignes perpendiculaires à l'axe du cylindre, tracées à une distance égale au quart de la longueur de la règle géodésique. Si la densité de la matière varie, si elle augmente, par exemple, ce qui est le cas le plus fréquent, la distance entre les deux traits diminuera d'une quantité correspondante.

Si cette diminution équivaut à 1 micron, le poids de l'eau contenue dans le tube thermométrique témoin variera de $3^{mgr},11$, ce tube renfermant $1^{kg},038\,81248$ d'eau à zéro. Si nous pouvons peser cette quantité à $\frac{1}{10}$ de milligramme près, toute variation de $\frac{1}{10}$ de micron produira une diminution de 31 des plus petites unités que nous pouvons apprécier par la balance ; on pourra donc déceler des variations de $\frac{1}{31}$ de micron dans la distance des deux traits, quantité dont l'appréciation est aujourd'hui bien difficile, même en ayant recours aux procédés de mesure les plus perfectionnés.

Or, nous ne connaissons aucun moyen d'obtenir une longueur qui ne varie pas avec le temps, à moins que ce ne soit la longueur d'onde d'un rayon de lumière monochromatique, comme celle du lithium ou du thallium. Nous verrons tout à l'heure entre quelles limites nous pouvons employer ce terme précieux de comparaison.

Toute mesure prise à la surface du globe est sujette à variation, car la croûte terrestre est constamment en mouvement ; les longueurs des bases changent ou peuvent changer par suite de mouvements intestins, tremblements de terre, élévation ou abaissement lent du sol. Une règle géodésique ne peut donc être définie par son rapport avec une base terrestre, si bien mesurée qu'elle soit, comme la base de Melun ou la base de Perpignan, sur laquelle le général Ibañez, notre président, nous a lu l'année dernière un si beau travail.

Les résultats qui nous ont été communiqués dans cette session (de Hambourg), par M. Andrae et d'autres membres de l'Association géodésique, rendent chaque jour plus frappante l'indétermination que comporte le choix d'une pareille base.

Si l'on prend la distance entre deux traits placés sur une barre métallique, on néglige les variations dont cette barre est susceptible dans sa constitution intime et dont M. Wild nous a fait un exposé complet.

Toutes les substances capables d'être trempées, comme le verre et l'acier, changent de dimensions avec le temps. D'autres, comme le zinc et le fer, qui peuvent cristalliser par les variations de température, sont encore dans le même cas. Le quartz hyalin, d'après les travaux de M. Wild, paraît échapper à cette mobilité de forme et, par suite, de densité. Le platine iridié se comporte-t-il comme l'acier et le zinc ou comme le quartz ? Nous résoudrons cette question en déterminant avec la plus grande précision possible la quantité d'eau à zéro que l'un de nos

tubes (T) peut contenir. Après toutes nos expériences, après avoir fait varier entre des limites très-étendues la température à laquelle aura été porté le métal, nous jaugerons de nouveau notre tube avec de l'eau à zéro : pour chaque variation de $3^{mgr},11$ dans le poids de l'eau il y aura une variation correspondante de $\frac{1}{1000}$ de millimètre dans la longueur comprise entre les deux traits.

En vous proposant de prendre un cylindre de platine iridié, cylindre aussi parfait que possible, susceptible d'être nivelé dans toute son étendue, terminé par deux calottes dont l'une porte à son pôle un tube capillaire en platine iridié, composé avec la même matière et fabriqué de la même manière que votre règle géodésique, nous vous proposons un système de contrôle pour la permanence des propriétés physiques et de la longueur de cette règle. Nous vous donnons ensuite, par la variation de la quantité d'eau à zéro contenue dans ce tube témoin, les éléments du calcul qui permettra d'en connaître à toute époque la longueur primitive.

C'est, en somme, remplacer une mesure de longueur par une mesure de poids, et nous remplaçons aussi la pesée d'un corps submergé, opération toujours grossière, par un jaugeage, lequel peut être aussi parfait que la balance le permet et surtout le permettra.

Quand cette opération aura été faite à la température de la glace fondante avec toute l'exactitude dont elle est susceptible aujourd'hui, le poids de cette eau sera représenté par une masse cylindrique de platine iridié qui lui fera équilibre, à $\frac{1}{10}$ de milligramme près, sur une balance placée dans le vide.

Pour plus de sécurité, ce cylindre de platine pourra être enfermé dans un cylindre de verre vide et fermé à la lampe. Il y a des exemples de la conservation pendant plus de quinze siècles de tubes ainsi fermés et contenant même un liquide.

Mais l'expérience que nous avons acquise en faisant depuis plus de trois ans des pesées répétées trois ou quatre fois par jour nous prouve que les balances placées dans l'air ne peuvent atteindre avec sécurité la précision nécessaire, ou plutôt que les pesées à l'air libre ne peuvent avoir une constance suffisante.

On ne peut admettre, sans démonstration, que les deux parties du fléau seront toujours à la même température, et il suffit d'une variation de température bien faible pour allonger ou raccourcir un fléau de $\frac{1}{5000000}$ de sa longueur. Il faut donc que ce fléau soit maintenu à une température invariable, c'est-à-dire entouré de glace. Mais alors la cage de la balance serait parcourue par des courants d'air, si sa base n'était pas elle-même à zéro, ce qui serait bien difficile à réaliser. En outre, si la matière qui compose le fléau n'est pas distribuée d'une façon rigoureusement symétrique par rapport à la ligne verticale qui passe par son centre de gravité, condition qu'on ne peut exiger, la balance subira, par l'influence des changements de température, de pression et d'état hygrométrique de l'air ambiant, des effets qu'il serait impossible de calculer exactement.

Nous avons tourné la question en déterminant la courbe des variations de notre balance par des observations qui ont duré souvent plus d'une année, mais ce moyen n'est pas radical.

Nous avons entouré notre balance d'une enveloppe de cuivre qui répartit la chaleur d'une manière assez uniforme sur toute la longueur du fléau; cette précaution, utile certainement, est encore insuffisante. Il faut donc que le fléau soit maintenu à la température de zéro et qu'il soit placé dans le vide.

Laissant de côté pour le moment les questions fort délicates qui se rattachent à la construction des balances, la nécessité, par exemple, même dans les meilleurs instru-

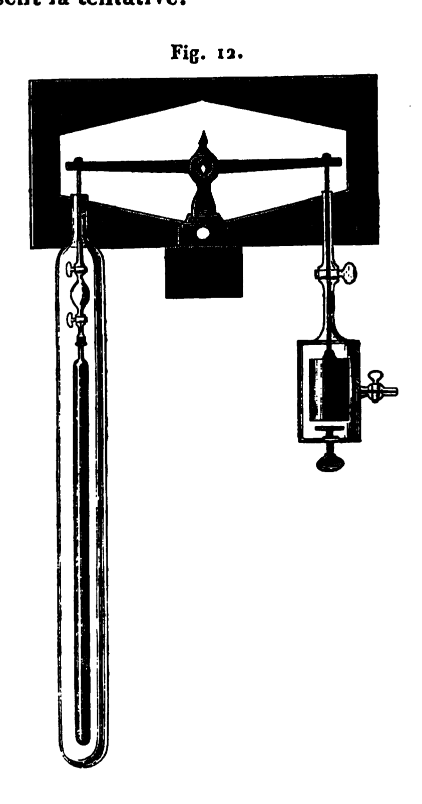
ments, d'y placer les poids de façon que leur centre de gravité passe toujours par le centre de gravité du plateau, cette autre circonstance que les couteaux des extrémités ne sont pas suffisamment assujettis à se placer de la même manière par rapport aux plans qu'ils supportent, d'où il résulte qu'en mettant plusieurs fois de suite la balance en repos, puis en mouvement, pour la même charge, on n'obtient pas la même déviation de l'aiguille, etc., nous avons combiné et nous vous proposons une balance construite d'après le principe suivant.

La balance posséderait un fléau tout en acier, préparé de telle sorte que les couteaux puissent être pris dans la masse même. Ce fléau serait placé dans une enveloppe en tôle épaisse entourée de glace qui l'enserrerait de très-près, afin que le volume à refroidir soit aussi petit que possible. Le mécanisme serait placé tout près du couteau central. Les organes essentiels de la balance occuperaient donc un très-petit volume, les aiguilles et les cadrans étant situés aux extrémités du fléau. Un long cylindre en verre, mastiqué à une ouverture de la cage près de l'une des extrémités, permettrait de suspendre à l'un des crochets de la balance le tube T de platine iridié. De l'autre côté se trouverait le plateau supportant les poids. Ce plateau, suspendu par un fil d'acier, serait placé dans une sorte de sas, pouvant être mis en communication avec l'intérieur de la balance, ou maintenu isolé, au moyen d'un gros robinet de verre dont le canon serait traversé par le fil qui supporterait le plateau. Un mécanisme facile à imaginer permettrait de détacher ce fil et de fermer le robinet quand on voudrait ouvrir le sas pour ajouter ou enlever des poids, le vide restant parfait dans la cage ; il suffirait donc de purger le sas après chaque opération.

La figure théorique 12 donne une idée de l'appareil. Nous avons demandé au Gouvernement français les fonds nécessaires pour le construire ; mais, si notre projet paraît

réalisable, nous serions très-heureux que d'autres que nous en fissent la tentative.

Fig. 12.



Le fléau en acier serait soustrait à l'action du magnétisme terrestre par son enveloppe en tôle de fer; de cette façon, l'emploi d'une matière aussi légère, aussi élastique et aussi rigide que l'acier ne présenterait plus aucun inconvénient.

Une pareille balance débarrasse l'opérateur de toutes les erreurs qu'il peut commettre, en observant le thermomètre, le baromètre et l'hygromètre, et de tous les calculs nécessaires pour corriger les résultats donnés par les instruments.

Mais il y a un problème dont nous n'avons pas abordé l'étude : c'est celui qui concerne la déformation du tube témoin et de la règle géodésique elle-même.

Un cylindre parfait d'une section circulaire est difficile à niveler, ou au moins son nivellement est une opération très-délicate. Cependant MM. Brunner frères ne trouvent pas impossible de fabriquer un cylindre avec le platine iridié et d'en vérifier l'horizontalité par l'emploi des niveaux. Dans ce cas, toute déformation produite à sa surface serait immédiatement sensible et même mesurable.

Pour rendre plus facile le nivellement de la règle thermométrique, nous avons demandé à M. Matthey de vouloir bien construire des règles creuses et prismatiques à base carrée, terminées par des surfaces planes à leurs deux extrémités. A l'un des bouts est fixé par la soudure autogène un tube capillaire s'ouvrant à l'intérieur et à l'extérieur, et susceptible d'être relié à un voluménomètre. M. Matthey en a mis de très-beaux spécimens à l'Exposition de 1878.

Des règles de cette forme peuvent avoir la longueur et les dimensions que l'on veut. Étant creuses et terminées par un tube capillaire, elles peuvent servir de thermomètres à air et donner elles-mêmes leur propre température avec une précision inconnue jusqu'ici.

Elles peuvent se niveler avec la plus grande facilité, et il ne serait pas étonnant qu'un jour on construisît ainsi des règles géodésiques rigides, légères et fort économiques, n'ayant pas besoin de divisions, ni de lames métalliques en laiton graduées servant de thermomètre. Mais ces questions sont prématurées, et leur étude viendra en son temps.

Avant de conclure, nous désirons poser la question de la conservation de notre témoin et de la manière dont on doit le soutenir pour qu'il ne fléchisse pas sous son poids.

La plupart des substances connues, et surtout celles qui paraissent les plus dures et les plus cassantes, le verre par

Nous terminerons ce Mémoire par une description succincte du procédé destiné à fixer d'une manière indépendante de toute grandeur variable avec le temps la longueur du millimètre qui nous servira d'unité.

Dans l'appareil employé pour déterminer le coefficient de dilatation du platine iridié, le tube le plus étroit (t), qui sert de témoin temporaire et qui est plongé constamment dans la glace, porte à chaque extrémité, au lieu d'un trait unique, un millimètre divisé en dixièmes. Après avoir pointé, par exemple, les deux traits du gros tube à une température quelconque, on amène le tube témoin sous les microscopes et l'on pointe à chaque extrémité la division du millimètre qui se trouve la plus rapprochée du croisement des fils. Comme la valeur du tambour micrométrique en fonction du millimètre divisé est facile à évaluer par expérience, on connaît donc en fonction des millimètres tracés sur le tube témoin la dilatation qu'a éprouvée le gros tube entre deux températures successives, telles que zéro et 100 degrés.

On a supposé implicitement que les deux millimètres sont identiques. Cette identité est très-probable, puisque les millimètres ont été tracés par la même machine et à la même époque. Toutefois, il est facile d'en vérifier l'exactitude en pointant les microscopes sur deux divisions, puis en répétant un nouveau pointé après avoir fait glisser l'auge d'une petite quantité dans le sens de sa longueur. La mesure de ce déplacement par les deux microscopes doit être la même.

Il faut connaître maintenant, par une comparaison plus ou moins directe, la valeur exacte de ces millimètres tracés sur le tube témoin.

Ces comparaisons sont nécessaires quand on se place au point de vue des mesures absolues ; il faudrait même aller plus loin, et rapporter la dilatation du tube principal à une unité de mesure qui serait complétement indépendante

des instruments qui ont été employés pour la déterminer.

L'unique longueur dans la nature qui paraisse absolument invariable, et qui est à portée de tous les expérimentateurs, est la longueur d'onde d'une lumière parfaitement définie. Il y a longtemps qu'Arago a indiqué ce moyen pour comparer l'unité de mesure à une grandeur que toutes les perturbations qui peuvent se produire sur la Terre ne sauraient modifier. Les progrès qu'a faits l'analyse spectrale de la lumière dans ces dernières années rendent aujourd'hui très-facile ce genre de comparaisons.

L'un des millimètres du tube témoin sera d'abord comparé avec un autre millimètre tracé sur une petite plaque de métal. Le nouveau millimètre ayant été tracé avec la même machine et dans les mêmes conditions, son identité avec le précédent sera sans doute assez grande pour que toute différence échappe aux moyens de comparaison les plus précis. On vérifie d'ailleurs cette identité en plaçant le tube témoin dans son auge, et le millimètre nouveau dans la cuve du grand tube, de façon que le chariot puisse l'amener sous l'un des microscopes. En maintenant les deux instruments dans la glace fondante, on les visera alternativement avec le microscope.

Pour comparer maintenant ce millimètre à la longueur d'onde d'une lumière bien définie, la disposition employée est la suivante :

Une boîte métallique parfaitement close, renfermant divers organes que nous allons indiquer, est munie d'un certain nombre de tubulures, fermées par des glaces, qui permettent d'y faire pénétrer la lumière pour produire des anneaux de Newton, d'en varier le nombre à volonté au moyen d'une vis micrométrique, et de mesurer le déplacement correspondant des surfaces entre lesquelles se manifeste le phénomène. Cette boîte est constamment entourée de glace fondante, et l'on y fait le vide absolu, de manière qu'aucune correction ne doit être apportée aux mesures.

paraître évident, devrait être démontré; mais il est clair qu'aucun procédé de mesure ne pourrait aujourd'hui être appliqué à la détermination de la tension de vapeur du platine iridié au-dessous de 100 degrés. Cependant nous croyons utile, mais aussi pour d'autres raisons, de renfermer dans une enveloppe de verre vide d'air et fermée à la lampe la masse de platine iridié qui doit servir de témoin pour constater la variabilité ou la permanence des propriétés physiques de la règle géodésique.

Enfin nous admettrons que la longueur d'onde du rayon rouge de la lithine ou vert du thallium est invariable avec le temps, de sorte qu'au moyen du millimètre, dont la longueur aura été exprimée par le nombre de franges qu'on peut compter entre ses deux traits extrêmes, les indications de notre micromètre seront indépendantes de toute valeur individuelle de l'instrument.

Ainsi rien n'est laissé à la pure appréciation : tous nos instruments devront pouvoir être reproduits, perfectionnés, sans que rien manque au contrôle absolu des opérations. Les unités choisies sont invariables avec le temps, et il sera toujours possible de répéter nos expériences tant qu'on aura du platine, de l'iridium, de la glace, du mercure et les instruments nécessaires à la production des phénomènes d'interférence.

SUR LA PRÉPARATION DE L'ÉTHER MÉTHYLFORMIQUE ET DE L'ALCOOL MÉTHYLIQUE PUR;

PAR MM. CH. BARDY ET L. BORDET.

Le procédé généralement suivi pour obtenir l'alcool méthylique à l'état de pureté parfaite consiste à préparer l'éther méthyloxalique et à le saponifier ensuite par un

alcali. Cette méthode donne des rendements si peu satisfaisants, qu'elle devient à peu près impraticable lorsqu'il s'agit de préparer l'alcool méthylique pur en quantité un peu considérable.

En effet, la préparation de l'oxalate de méthyle, si facile à réaliser sur une petite échelle, devient une opération extrêmement longue et fastidieuse lorsqu'on veut obtenir seulement quelques kilogrammes de cet éther. Ensuite, la saponification au moyen de la soude ou de l'ammoniaque ne se fait qu'avec lenteur et fournit l'alcool méthylique extrêmement dilué. Pour amener ce produit à l'état anhydre, il faut donc recourir à de très-nombreuses distillations qui entraînent des pertes énormes.

Dans ces dernières années, on a proposé de purifier l'alcool méthylique commercial en le transformant en éther méthylformique qui, bouillant à 32 degrés, peut être facilement séparé de toutes les impuretés. Nous avons constaté que cette méthode n'offrirait guère d'avantages réels si l'on en était réduit pour la préparation de l'éther méthylformique aux procédés indiqués jusqu'ici ; mais nous avons pu simplifier tellement cette préparation, que la purification de l'alcool méthylique devient une opération des plus simples, même lorsqu'on veut agir sur des quantités considérables.

Préparation de l'éther méthylformique. — Examinons d'abord les procédés généralement employés.

La distillation de l'alcool méthylique avec un mélange d'eau, d'acide sulfurique, de bioxyde de manganèse et d'amidon fournit, en même temps que l'éther cherché, une quantité considérable de méthylal qui, bouillant à 42 degrés, se sépare ensuite très-difficilement de l'éther méthylformique.

La distillation de l'alcool méthylique avec de la glycérine saturée d'acide oxalique, comme pour une préparation d'acide formique, donne de très-faibles rendements et exige

des opérations multipliées, parce que l'action éthérifiante de la glycérine s'épuise très-vite.

L'emploi de l'acide formique cristallisable, qui éthérifie l'alcool méthylique par un simple contact suffisamment prolongé, a l'inconvénient d'être extrêmement coûteux, parce que l'acide formique cristallisable ne se trouve dans le commerce qu'à un prix relativement assez élevé.

Enfin, la distillation du formiate de soude ou de chaux avec de l'alcool méthylique saturé de gaz chlorhydrique entraîne un dégagement considérable de fumées acides toujours désagréables ; de plus, lorsque le contact de l'acide chlorhydrique avec l'alcool méthylique a été un peu prolongé, on ne recueille pour ainsi dire pas d'éther formique, presque tout l'alcool se transformant en chlorure de méthyle.

Nous avons essayé de remplacer l'acide chlorhydrique par de l'acide sulfurique suffisamment étendu pour ne pas détruire d'une manière sensible l'acide formique mis en liberté; on évite ainsi les inconvénients indiqués ci-dessus; mais, dans ce cas, le sulfate de soude qui se forme empâte le formiate de soude, de façon qu'une grande partie de ce sel reste inattaquée, ce qui diminue beaucoup le rendement de l'opération.

Nous avons alors essayé de faire agir sur le formiate de soude un mélange d'alcool méthylique et d'acide chlorhydrique aqueux, et nous avons reconnu que dans ces conditions le formiate de méthyle prend naissance presque instantanément et s'isole facilement par distillation.

Le meilleur mode opératoire est le suivant : Dans un ballon contenant le formiate de soude séché à 130-140 degrés et pulvérisé, on introduit, d'un seul coup et en agitant, le mélange d'alcool méthylique et d'acide chlorhydrique aqueux, les trois corps étant pris en proportions équivalentes, sauf un petit excès d'alcool méthylique. On adapte

au col du ballon un serpentin entouré d'eau froide qu'on ne renouvelle pas, puis, au-dessus de ce serpentin, un tube à dégagement qui conduit les vapeurs à un second serpentin soigneusement refroidi. On plonge le ballon dans un bain d'eau froide dont on élève doucement la température jusqu'à l'ébullition. L'eau qui entoure le serpentin ascendant s'échauffe peu à peu; lorsqu'elle atteint la température de 45 degrés, ce qui n'arrive que lorsque le bain-marie qui entoure le ballon est en pleine ébullition depuis assez longtemps, on peut considérer l'opération comme terminée. On trouve alors dans le récipient placé à la sortie du deuxième serpentin un liquide qui, agité avec quelques gouttes de soude pour le débarrasser d'une trace d'acide chlorhydrique qu'il contient souvent, puis rectifié une ou deux fois au bain-marie, fournit du formiate de méthyle parfaitement pur et anhydre, bouillant à 32 degrés.

En partant de 2 kilogrammes de formiate de soude, nous avons obtenu, à plusieurs reprises, 1610 grammes d'éther formique pur. Le rendement théorique serait de 1764 grammes, en supposant le formiate de soude parfaitement pur et anhydre, ce qui n'a jamais lieu. Ce résultat indique donc que l'éthérification de l'acide formique a lieu d'une manière à peu près complète, fait digne de remarque, si l'on songe que la réaction se passe en présence de $2^{kg},150$ d'eau.

Le choix de l'alcool méthylique employé dans cette préparation n'est pas indifférent. Il faut éviter la présence des impuretés dont le point d'ébullition est inférieur à celui de l'alcool méthylique et se rapproche, par suite, de celui de l'éther qu'on veut obtenir. Le mieux est d'employer ce que l'industrie appelle des *méthylènes de queue*. Si l'on ne peut pas s'en procurer, on prend les beaux méthylènes à 99 degrés que l'on trouve facilement dans le commerce, et, par surcroît de précaution, on les rectifie en rejetant

les portions qui passent au-dessous du point d'ébullition de l'alcool méthylique.

Saponification de l'éther méthylformique.— Quand on a obtenu l'éther méthylformique, la préparation de l'alcool méthylique pur est extrêmement simple, car la saponification de l'éther est d'une facilité remarquable. On la réalise au moyen d'une dissolution de soude caustique marquant environ 30 degrés B. et dont on connaît le titre exact en alcali. On l'emploie en quantité équivalente à celle de l'éther à saponifier, ou tout au moins on n'en prend qu'un très-léger excès. Comme la réaction entre les deux corps est très-énergique et dégage beaucoup de chaleur, il faut prendre certaines précautions pour éviter les pertes. On met le formiate de méthyle dans un ballon plongé dans un bain d'eau maintenue très-froide; le col du ballon reçoit un bouchon à deux trous; dans l'un pénètre l'extrémité d'un serpentin soigneusement refroidi et ouvert à son extrémité supérieure, dans l'autre se trouve un robinet. On verse la soude par l'extrémité supérieure du serpentin, en opérant par très-petites portions. On facilite l'entrée du liquide dans le ballon en ouvrant le robinet pendant un instant. Après chaque introduction de soude, on agite légèrement le ballon. Quand toute la soude est introduite et que la réaction est tout à fait calmée, on enlève le ballon en le séparant de son bouchon, on le ferme avec un bouchon plein et on l'agite vivement à plusieurs reprises pour faire disparaître la petite couche d'éther qui pourrait se trouver encore inaltérée. Si, à ce moment, la liqueur est encore légèrement alcaline, on la rend neutre par l'addition de quelques gouttes d'acide formique.

Le contenu du ballon est alors distillé; on recueille tout ce qui passe jusqu'à 99 degrés et l'on obtient ainsi un alcool méthylique aqueux qui marque environ 65 degrés à l'alcoomètre. Deux distillations sur du carbonate de potasse l'amènent à marquer 100 degrés. Ces différentes opéra-

tions n'entraînent pas de pertes sensibles, de sorte qu'on obtient une quantité d'alcool correspondant presque exactement à celle de l'éther employé. On n'a plus alors qu'à distiller le produit deux fois sur du sodium, puis une fois sur un peu d'acide phosphorique anhydre, pour le débarrasser des dernières traces d'eau.

Remarquons, en terminant, que le résidu de la saponification de l'éther méthylformique est du formiate de soude pur que l'on peut dessécher et employer à nouveau pour la préparation de formiate de méthyle.

Il résulte de là qu'une quantité donnée de formiate de soude peut servir à la purification de quantités considérables d'alcool méthylique.

Ajoutons enfin que nous avons tenté de remplacer la soude par la chaux dans la série des opérations dont nous venons de parler, et que les résultats nous ont paru tout aussi satisfaisants.

MÉMOIRE SUR LE DOSAGE DE L'ALCOOL MÉTHYLIQUE DANS LES MÉTHYLÈNES COMMERCIAUX;

PAR MM. CH. BARDY ET L. BORDET.

En 1873, M. Krell (¹) a fait connaître, pour le dosage de l'alcool méthylique dans les méthylènes, une méthode fondée sur la transformation de l'alcool méthylique en iodure de méthyle dont on mesure le volume. En 1874 et 1876, MM. Krœmer et Grodski (²) ont soumis cette méthode à un examen critique assez étendu; mais leurs tra-

(¹) *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*, t. VI, p. 1310.

(²) *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft* t. VII, p. 1494, et t. IX, p. 1931.

vaux ont laissé subsister deux lacunes importantes. En effet, ces chimistes n'ont pu parvenir à démontrer que l'alcool méthylique absolument pur et anhydre se transforme intégralement en iodure de méthyle, dans les conditions où s'effectuent les analyses. En second lieu, ils ont reconnu que la méthode donne des résultats inexacts quand le méthylène analysé renferme de l'acétone, c'est-à-dire dans le cas presque général, mais ils n'ont indiqué aucun moyen d'obvier à cet inconvénient grave. Ayant eu occasion de faire de nombreuses analyses de méthylènes, nous avons pu introduire dans le mode opératoire quelques petits perfectionnements de détail, mais nous avons porté surtout notre attention sur les deux points que nous venons d'indiquer. Cela nous a semblé nécessaire pour mettre le principe même de la méthode à l'abri de toute objection.

L'appareil dont nous nous servons est représenté ci-contre. C'est un petit ballon fermé par un bouchon de verre portant une pipette à robinet et un tube dont le prolongement présente trois renflements ovoïdes enfermés dans un réfrigérant de Liebig où circule un courant d'eau aussi froide que possible. Le bouchon de verre a l'inconvénient d'être très-fragile; on peut à la rigueur le remplacer par un bouchon de caoutchouc à deux trous, mais alors les résultats qu'on obtient sont moins exacts, parce que le caoutchouc est énergiquement attaqué par les corps qu'on fait réagir dans le ballon.

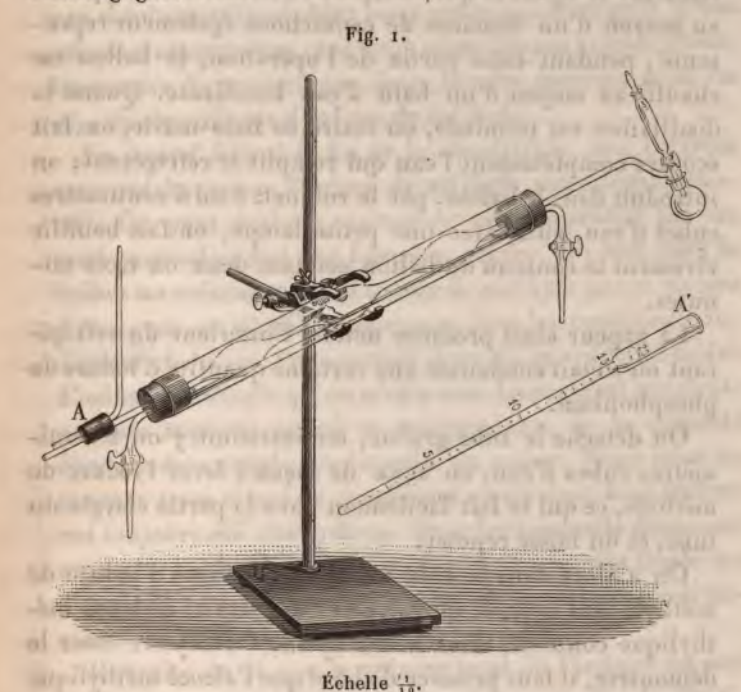
Pour transformer l'alcool méthylique en iodure de méthyle, on emploie de l'iodure de phosphore (PhI^2) et de l'acide iodhydrique.

L'iodure de phosphore que l'on trouve dans le commerce retient souvent du sulfure de carbone, dans lequel il a été préparé; on doit éviter avec soin la présence de cette impureté qui, se mélangeant avec l'iodure de méthyle, en augmente le volume apparent. L'acide iodhydrique dont on se sert est chargé d'iode; on le prépare avec de l'acide de

densité 1,7, dans lequel on fait dissoudre un poids d'iode égal au sien.

L'opération s'effectue de la manière suivante. L'appareil est tout d'abord incliné de telle sorte que le réfrigérant fasse refluer dans le ballon toutes les vapeurs qui peuvent s'en dégager.

Fig. 1.



Échelle $\frac{1}{10}$.

On place dans le ballon 15 grammes d'iodure de phosphore et une petite quantité de brique râpée destinée à empêcher les soubresauts à la fin de l'opération, puis on le fixe sur le bouchon. Dans la pipette on introduit 5 centimètres cubes du méthylène à essayer, mesurés avec une pipette à deux traits, exactement jaugée. Au moyen du robinet on fait pénétrer ce liquide dans le ballon, goutte à goutte et très-lentement. Ensuite, par le même moyen, on

introduit 5 centimètres cubes d'acide iodhydrique. Enfin on plonge le ballon dans un bain-marie à 80-90 degrés pendant quelques minutes. Cela fait, on incline l'appareil de façon à distiller le contenu du ballon. Le réfrigérant condense les vapeurs que l'on recueille dans un tube gradué représenté sur la figure et qui s'adapte à l'extrémité de l'appareil au moyen d'un bouchon de caoutchouc également représenté; pendant cette partie de l'opération, le ballon est chauffé au moyen d'un bain d'eau bouillante. Quand la distillation est terminée, on retire ce bain-marie, on fait écouler complétement l'eau qui remplit le réfrigérant; on introduit dans le ballon, par le robinet, 5 ou 6 centimètres cubes d'eau, puis, avec une petite lampe, on fait bouillir vivement le contenu du ballon pendant deux ou trois minutes.

La vapeur ainsi produite nettoie l'intérieur du réfrigérant où s'était condensée une certaine quantité d'iodure de phosphonium.

On détache le tube gradué, on introduit 7 ou 8 centimètres cubes d'eau, on agite de façon à laver l'iodure de méthyle, ce qui se fait facilement dans la partie élargie du tube, et on laisse reposer.

On a alors dans le tube un certain volume d'iodure de méthyle qui permet de calculer la quantité d'alcool méthylique contenue dans le méthylène à analyser. Pour le démontrer, il faut prouver d'abord que l'alcool méthylique absolument pur et anhydre se transforme intégralement en iodure de méthyle dans les conditions que nous venons d'indiquer, et en second lieu que les divers autres corps qui accompagnent l'alcool méthylique dans les méthylènes n'empêchent pas de calculer exactement les résultats. Nous avons donc plusieurs cas à examiner.

1. *Cas de l'alcool méthylique pur.*

Pour évaluer le volume total de l'iodure de méthyle produit, il ne faut pas considérer seulement la quantité de ce corps que l'on voit dans le tube gradué. En effet, il n'est pas absolument insoluble; nous avons constaté qu'il se dissolvait aisément dans cent vingt-cinq fois son volume d'eau. La couche d'eau contenue dans le tube contient donc les $\frac{8}{1000}$ de son volume d'iodure de méthyle.

En second lieu, à la fin de la distillation, une certaine quantité de vapeur d'iodure de méthyle reste dans l'appareil. On peut évaluer exactement cette quantité par un essai particulier fait une fois pour toutes. On met dans le ballon un volume connu d'iodure de méthyle pur et un peu d'eau, puis on distille exactement dans les conditions indiquées ci-dessus. On constate alors qu'on recueille moins d'iodure de méthyle qu'on n'en a mis. La perte est constante pour un appareil donné et indépendante de la quantité d'iodure de méthyle sur laquelle on opère. Nous nous en sommes assurés par de nombreux essais dont les résultats ont toujours été concordants. Pour les appareils dont nous nous servons habituellement et dont la capacité totale est d'environ 140 centimètres cubes, la perte est généralement de $0^{cc},25$.

Il résulte de là que le volume total de l'iodure de méthyle produit dans un essai effectué, comme il a été dit ci-dessus, se compose de trois parties, savoir : le volume de l'iodure recueilli en nature, le volume d'iodure dissous dans l'eau du tube et la perte constante caractéristique de l'appareil employé.

Ceci posé, nous avons calculé le volume d'iodure que doit donner l'alcool méthylique pur et anhydre en supposant la transformation complète. Comme une pipette jaugée de 5 centimètres cubes, si exacte qu'elle soit, ne donne jamais rigoureusement 5 centimètres cubes d'alcool mé-

thylique, nous avons déterminé par des pesées directes le poids de l'alcool que nous introduisons dans l'appareil au moyen de notre pipette ordinaire ; nous avons déduit de ce nombre le poids de l'iodure de méthyle à obtenir. Comme les indications que l'on trouve dans les auteurs relativement à la densité de ce corps sont très-divergentes, nous avons déterminé cette densité avec le plus grand soin ; nous l'avons trouvée égale à 2,2677 à 15 degrés. Nous en avons conclu que nos essais effectués avec de l'alcool méthylique pur devaient nous donner, à 15 degrés, $7^{cc},74$ d'iodure.

Nous avons alors effectué trois essais successifs qui nous ont fourni en moyenne $7^{cc},73$ d'iodure, c'est-à-dire un nombre aussi voisin du nombre théorique qu'on peut le désirer.

2. *Cas d'un mélange d'alcool méthylique et d'acétone.*

On rencontre ici une difficulté : l'iodure de méthyle retient, même après avoir été agité avec de l'eau, une certaine quantité d'acétone inaltérée qui augmente le volume de telle façon, que les résultats obtenus sont toujours trop forts, et souvent dans une proportion considérable.

Nous avons alors cherché un moyen d'évaluer la quantité réelle d'iodure de méthyle qui existe dans un mélange de ce corps et d'acétone, et nous avons trouvé qu'un simple lavage à l'eau, effectué dans des conditions particulières, permet d'atteindre ce but. Pour cela, nous avons pris une série de mélanges d'iodure de méthyle et d'acétone dans lesquels la proportion du premier corps variait de 70 à 99 pour 100. En agitant chacun de ces mélanges avec son volume d'eau, nous avons constaté que le volume apparent de l'iodure de méthyle subissait une diminution, toujours la même pour un mélange donné, et variable d'un mélange à l'autre. Nous avons alors inscrit dans un Tableau les diminutions de volume observées et, en regard, les compositions des mélanges correspondants.

Voici ce Tableau :

Diminution du volume apparent d'un mélange d'iodure de méthyle et d'acétone quand on l'agite avec son volume d'eau. (n pour 100)	Volume réel d'iodure de méthyle contenu dans le volume apparent primitif supposé égal à 100. (p)
18,7	70
18,0	71
17,3	72
16,6	73
15,9	74
15,2	75
14,6	76
13,9	77
13,2	78
12,5	79
11,8	80
11,2	81
10,6	82
10,0	83
9,5	84
8,9	85
8,3	86
7,7	87
7,1	88
6,5	89
5,9	90
5,3	91
4,7	92
4,1	93
3,5	94
2,9	95
2,4	96
1,8	97
1,3	98
1,0	99
0,8	100

Il devient dès lors facile, dans une analyse, d'éliminer la cause d'erreur due à la présence de l'acétone ; quand on a agité l'iodure recueilli avec de l'eau, comme nous l'avons dit plus haut, on note le volume apparent de l'iodure, on siphonne l'eau surnageante, et l'on effectue un deuxième lavage avec un volume d'eau égal à celui de la couche d'iodure. Celle-ci subit alors une diminution, d'où l'on conclut immédiatement, au moyen du Tableau ci-dessus, le volume réel de l'iodure contenu dans le volume apparent primitif.

Au nombre ainsi obtenu il y a lieu, ici encore, d'ajouter deux autres nombres, pour avoir la quantité totale d'iodure fournie par le mélange analysé. L'un de ces nombres est la perte constante due à l'appareil employé ; l'autre représente la quantité d'iodure dissoute dans l'eau du premier lavage, quantité qui est toujours les $\frac{8}{1000}$ du volume de cette eau, car nous avons constaté que de l'eau chargée d'acétone, même en proportion assez élevée, ne dissout pas sensiblement plus d'iodure de méthyle que l'eau pure.

Comme vérification de tous les faits qui précèdent, nous avons soumis à l'analyse divers mélanges artificiels d'alcool méthylique et d'acétone ; nous en citerons seulement deux, qui contenaient, l'un 40, l'autre 70 pour 100 du premier corps, et qui ont donné les nombres 41 et 70,2 pour 100. Ces résultats sont suffisamment approchés pour qu'on puisse considérer comme négligeables les erreurs dues à la présence de l'acétone.

3. *Cas d'un méthylène ordinaire.*

Outre l'alcool méthylique et l'acétone, les méthylènes commerciaux peuvent renfermer de l'eau, de l'acétate de méthyle, du diméthylacétal, de l'alcool allylique, etc. Tous ces derniers éléments sont en général si peu abondants, qu'on peut négliger les erreurs dues à leur présence. Les chimistes allemands que nous avons cités en commençant ont étudié l'influence de l'acétate de méthyle et indiqué le

moyen d'en tenir compte si c'est nécessaire. Quant à l'eau, elle n'exerce aucune action perturbatrice.

On peut donc traiter un méthylène comme un mélange d'alcool méthylique et d'acétone, et, en opérant comme nous l'avons dit plus haut, on obtient des résultats d'une exactitude très-suffisante pour les besoins de la pratique.

Pour atteindre toute la précision que la méthode comporte, il est bon de prendre quelques précautions.

Pour la lecture des volumes de l'iodure de méthyle, on doit opérer toujours à la même température et aussi près que possible de 15 degrés, car l'iodure de méthyle a un coefficient de dilatation très-considérable.

Quand on analyse un méthylène très-pauvre en alcool méthylique, la plus grande partie de l'acide iodhydrique qui se trouve dans le ballon reste sans emploi et se dégage de l'appareil en répandant d'abondantes fumées; nous avons reconnu que ces fumées entraînent toujours avec elles une certaine quantité d'iodure de méthyle et que toutes les fois qu'elles se produisent un peu abondamment on a des résultats trop faibles. On peut toujours éviter ces fumées en réduisant les quantités d'iodure de phosphore et d'acide iodhydrique employées dans l'analyse. Supposons qu'un méthylène contienne seulement 50 pour 100 de son volume d'alcool méthylique. En l'analysant comme d'ordinaire, on aura un résultat un peu trop faible, parce qu'il se dégagera beaucoup de fumées pendant l'opération. Si, au contraire, on l'analyse en n'employant qu'environ $7^{gr},5$ d'iodure de phosphore et $2^{cc},5$ d'acide iodhydrique, on obtiendra un résultat très-approché de la vérité.

Dans la pratique, lorsqu'on veut faire un dosage très-exact, il est donc bon d'effectuer deux analyses. Dans la seconde on emploie les réactifs en quantités réduites, calculées d'après le résultat obtenu dans la première.

Il ne nous reste plus, pour terminer et pour résumer tout ce qui précède, qu'à indiquer comment se fait le calcul d'une analyse.

Les données fournies par l'opération sont :

Le volume apparent v de l'iodure après le premier lavage à l'eau;

Le volume v' de l'eau ayant servi à ce lavage.

Enfin, la diminution n pour 100 qu'éprouve le volume v de l'iodure au second lavage (effectué, comme nous l'avons dit, avec un volume d'eau égal à v).

Appelons a la perte constante caractéristique de l'appareil employé, nombre qu'on détermine une fois pour toutes.

On cherche dans le Tableau que nous avons fait connaître plus haut le nombre n ou le nombre qui s'en approche le plus; on trouve en regard le nombre p qui permet, en multipliant le volume apparent v de l'iodure par $\frac{p}{100}$, d'avoir le volume réel.

La quantité totale d'iodure produite dans l'analyse est donc

$$v \times \frac{p}{100} + v' \times \frac{8}{1000} + a$$

ou bien

$$\frac{pv + 0,8 \times v' + 100a}{100}.$$

Si le méthylène analysé avait été formé d'alcool méthylique chimiquement pur, il aurait donné $7^{cc},74$ d'iodure. Il contient donc, en centièmes, un volume d'alcool méthylique égal à

$$\frac{pv + 0,8 \times v' + 100a}{7,74}.$$

Cette formule devient plus simple si, dans le premier lavage de l'iodure obtenu, on s'arrange pour que la couche d'eau et celle d'iodure aient le même volume final. Dans ce cas, en effet, v' devient égal à v, et l'on a pour le titre du méthylène analysé

$$\frac{p(v + 0,8) + 100a}{7,74}.$$

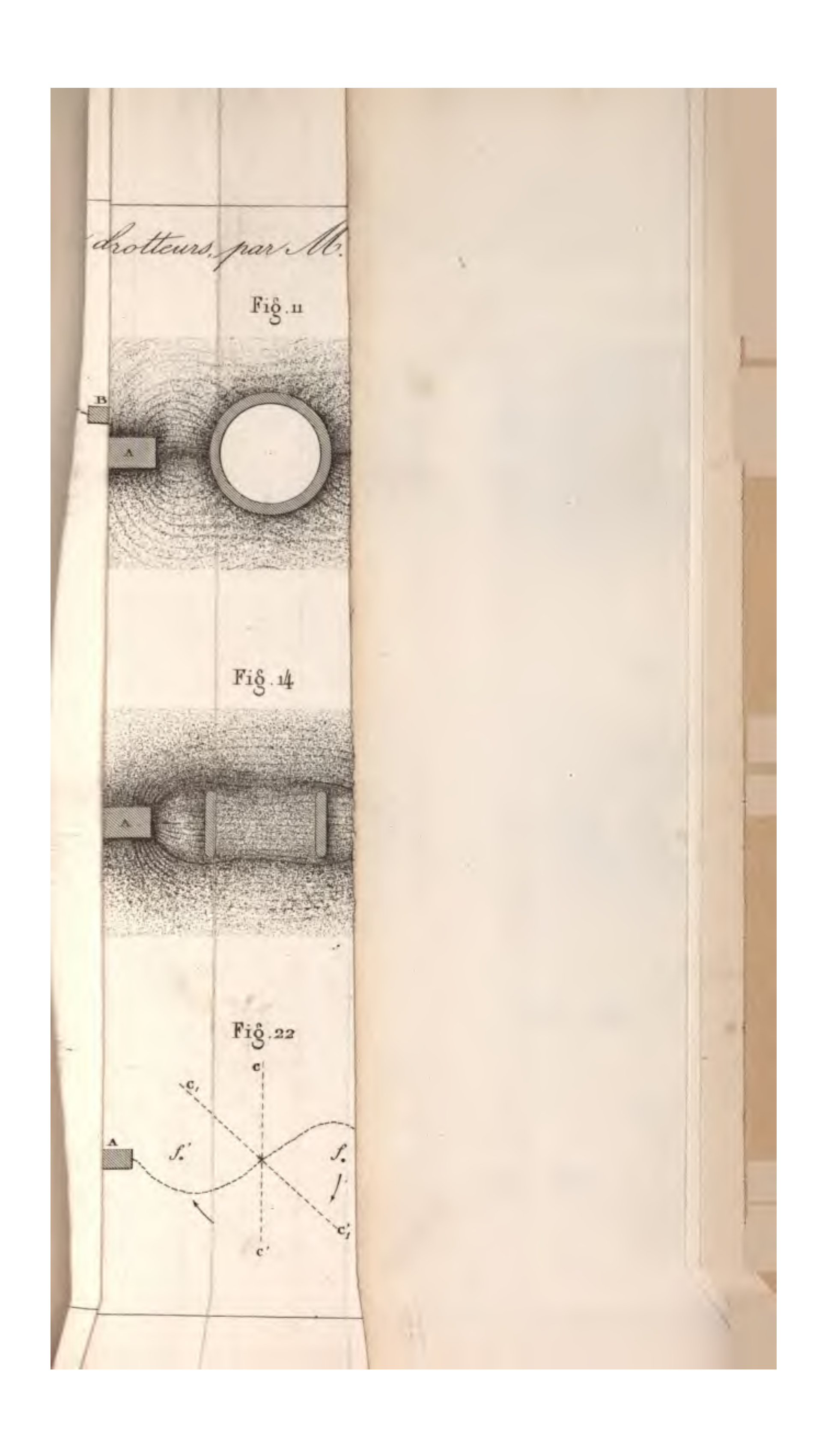
TABLE DES MATIÈRES,

TOME XVI (5e série).

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES DU TOME XVI (5e SÉRIE).

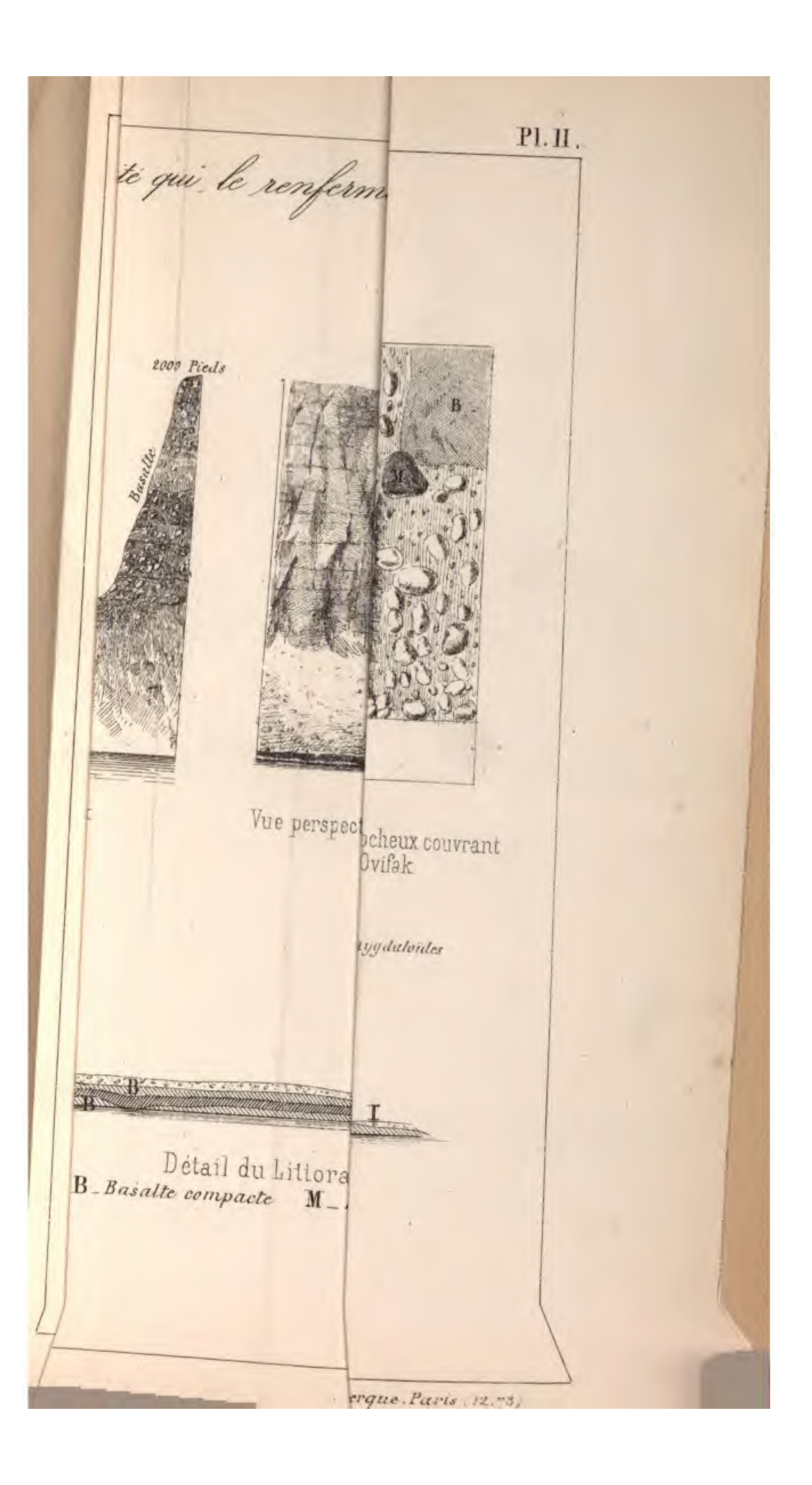
PLANCHES.

Paris. — Imprimerie de GAUTHIER-VILLARS, quai des Augustins, 55


drotteurs, par M.
Fig. 11
B
A
Fig. 14
A
Fig. 22
c
c_1
A
f.'
f.
c_1'
c'



Pl. II.


té qui le renferm
2000 Pieds
Basalte
B
M
Vue perspect
ocheux couvrant
Ovifak
ygdaloïdes
B
B
I
Détail du Littora
B _ Basalte compacte
M _
rque. Paris (12.73)

